VERGLEICHENDE SUBJEKTIVE UNTERSUCHUNGEN ZUR AKUSTIK VON KONZERTSÄLEN

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Karl Friedrich Siebrasse
aus Eschwege

Göttingen 1973

VERGLEICHENDE SUBJEKTIVE UNTERSUCHUNGEN ZUR AKUSTIK VON KONZERTSÄLEN

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Karl Friedrich Siebrasse
aus Eschwege

Göttingen 1973

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

D 7

Referent: Prof. Dr. M.R. Schroeder

Korreferent: Prof. Dr. H.-U. Harten

Tag der mündlichen Prüfung: 10. 5. 1973

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung Seite 1

2. Die Speicherung des akustischen Raumeindruckes 3
   2.1. Das Aufnahmeverfahren 4
   2.2. Das Wiedergabeverfahren 6
      2.2.1. Die Wiedergabe über Kopfhörer 6
      2.2.2. Die Wiedergabe über Lautsprecher 8
   2.3. Untersuchungen zur Realisierung der Wiedergabefilter 12
      2.3.1. Die Meßmethode 13
      2.3.2. Das Filter für Kopfhörerwiedergabe 14
      2.3.3. Das Filter für Lautsprecherwiedergabe 20
      2.3.4. Das praktisch verwendete Filter 32

3. Das Auswertungsverfahren für die subjektiven Hörvergleiche 35
   3.1. Die Fragestellung 37
   3.2. Das Modell 38
   3.3. Das Auswertungsverfahren 40

4. Die subjektiven Untersuchungen an Konzertsälen 48
   4.1. Die Aufnahmen in den Sälen 48
   4.2. Die Hörvergleiche 52
   4.3. Die Ergebnisse der Hörvergleiche 53
      4.3.1. Zur Zusammenfassung der Präferenzmatrizen zu eindimensionalen Präferenzskalen 55
      4.3.2. Die Bestimmung der Faktorenzahl 57
      4.3.3. Die Konfiguration der Schallfelder im Präferenzraum 61
   4.4. Zusammenfassung und Folgerungen aus den Resultaten 69

Literatur 71

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41534922_0013

1. Einleitung

Akustische Messungen an Konzertsälen lassen sich aufteilen in die objektiven Messungen von durch Meßvorschriften definierten oder wenigstens definierbaren Größen und die subjektive Beurteilung der Akustik bzw. der Hörsamkeit der Säle. Eine Korrelation zwischen den objektiven Daten und subjektiven Beurteilungen sollte dann zur Beantwortung der Frage führen: Welche objektiven physikalischen Eigenschaften muß ein Konzertsaal besitzen, damit er als akustisch gut beurteilt wird?

Diese Arbeit beschreibt eine Methode, nach der subjektiv vergleichende akustische Untersuchungen an Konzertsälen bzw. allgemein an Räumen durchgeführt werden können, und ein numerisches Verfahren zur Analyse der in subjektiven Vergleichen gewonnenen Qualitätsurteile . Mit Hilfe einer Digital-Rechenanlage werden sowohl die subjektiven Daten aus Hörvergleichen ausgewertet als auch die dafür benutzten Schallsignale bearbeitet. Es werden die Ergebnisse derartiger Untersuchungen an 25 verschiedenen Konzertsälen dargestellt.

Um gemeinsame subjektiv empfundene Eigenschaften verschiedener Räume zu erfassen, ist es erforderlich, Urteile einer größeren Anzahl von Personen auszuwerten. Diese Personen müssen jeweils mehrere Räume kennen, um vergleichende Beurteilungen abgeben zu können. L.L. BERANEK (1962) befragte deshalb Dirigenten, Solisten, Orchestermusiker und Musikkritiker nach ihrer subjektiven Meinung über die ihnen bekannten Konzertsäle. In einer Zusammenfassung all dieser Urteile stellte er eine Qualitätsskala auf, die er dann mit den objektiven Daten der Säle verglich. Diese Skala, auf der die Konzertsäle in wenigen Gruppen zusammengefaßt sind, konnte allerdings nur sehr grob sein, da einerseits der Zusammenhang zwischen den Beurteilungskriterien der einzelnen Personen offen war und andererseits die urteilenden Personen - mit Ausnahme der Kritiker - die Säle

in der Regel an Plätzen erlebt hatten, die zum Hören sicher bei weitem nicht optimal waren, nämlich auf der Bühne. Auch T. SOMERVILLE (1953) bei seinen Untersuchungen an BBC-Studios benutzte eine sehr grobe Qualitätsskala, die im wesentlichen die unter den Angehörigen des technischen Stabes der BBC und den die Studios benutzenden Künstlern verbreitete Meinung über die Räume darstellte.

Eine wesentlich genauere Methode zur Erfassung der subjektiven Beurteilungen wendeten R.J. HAWKES und H. DOUGLAS (1971) bei ihren Untersuchungen an einigen englischen Konzertsälen an. Die präzise Fragestellung nach bestimmten subjektiv empfundenen Eigenschaften der Säle führte zur Auslese einiger wichtiger Kriterien, nach denen die Hörer die Akustik von Konzertsälen beurteilten. Offen bleibt aber auch hier noch die Frage, ob durch die gewählte Fragestellung wirklich alle subjektiv eine Rolle spielenden Merkmale erfaßt worden sind.

Ein entscheidender gemeinsamer Mangel aller bisherigen subjektiven Untersuchungen liegt aber darin, daß die eigentlichen Vergleiche, nämlich das Hören in den verschiedenen Sälen, räumlich und vor allem auch zeitlich sehr weit auseinander lagen. Voraussetzung für den dann durchgeführten Vergleich ist ein "akustisches Gedächtnis", wie es bei den meisten Menschen wohl nur sehr unzureichend vorhanden ist. Man kann sich zwar mehr oder weniger pauschal an einen Eindruck erinnern, der durch ein Hörerlebnis hervorgerufen wurde, aber ein echter Vergleich, auch noch bezüglich bestimmter akustischer Merkmale, ist sicher über Zeiträume, die bis zu Monaten oder gar Jahren gehen, nicht durchführbar. Voraussetzung für die Durchführung eines echten subjektiven Vergleichs zwischen verschiedenen Räumen ist ein Verfahren, mit dem man deren "Akustik" speichern und reproduzieren kann, um den urteilenden Personen dann die Möglichkeit zu geben, die Höreindrücke aus verschiedenen Räumen direkt alternativ miteinander vergleichen zu können. Diese Voraussetzung ist durch das im Folgenden beschriebe-

ne Verfahren weitgehend erfüllt. Auch die Fragestellung hat in einer Weise zu geschehen, daß die gesamte Variationsbreite subjektiver Urteile im Ergebnis berücksichtigt wird. Auch hierzu wird ein Verfahren angegeben und an der durchgeführten Untersuchung erläutert.

2. Die Speicherung des akustischen Raumeindruckes

Der subjektive Eindruck von der Hörsamkeit eines Konzertsaales wird hervorgerufen durch die Wahrnehmung des Direktschalles, der von der Schallquelle auf der Bühne zum Hörerplatz gelangt, und der zeitlich immer dichter folgenden, aber in der Intensität abnehmenden Reflexionen an den Begrenzungsflächen des Saales. Dieser Nachhallvorgang besitzt als akustische Übertragung eine Impulsantwort und eine Übertragungsfunktion. Unterschiede zwischen den Sälen bestehen in der Abklingzeit des Nachhallvorganges, also der Nachhallzeit, und weiteren Eigenschaften, die sich aus der Impulsantwort des Übertragungssystems Bühne-Hörerplatz bestimmen lassen. Eine Reproduktion oder Synthetisierung der Akustik eines Konzertsaales sollte möglichst genau den gesamten Nachhallvorgang wiedergeben, d.h. alle Einzelreflexionen sollten in Betrag, Verzögerung und Einfallsrichtung wiedergegeben werden.

Eine Möglichkeit, dies zu realisieren, bietet eine Apparatur, wie sie von W. BURGTORF und H.-P. SERAPHIM (1961) und von E. MEYER, W. BURGTORF und P. DAMASKE (1965) beschrieben wurde. Man bestimmt die oben genannten Eigenschaften der Einzelrückwürfe entweder im Originalraum oder geometrisch aus Bauplänen und setzt dann das Schallfeld mit Hilfe von Verzögerungseinrichtungen, Abschwächern und einer Vielzahl von Verstärkern und Lautsprechern im reflexionsfreien Raum zusammen. Dieses Verfahren kann sich natürlich wegen der riesigen Anzahl von Einzelrückwürfen nur auf einige frühe Rückwürfe (ca. 10 bis 15) erstrecken. Der weitere Nachhall muß im wesentlichen unabhängig vom Originalschall-

feld hinzugefügt werden (M.R. SCHROEDER und B.F. LOGAN (1960) und (1961), B. WAGENER (1971)). WAGENER hat gezeigt, daß dieses Verfahren nicht geeignet ist, echte Unterschiede zwischen Konzertsälen durch subjektive Vergleiche der Nachbildungen herauszufinden. Es scheint erforderlich zu sein, wesentlich mehr Einzelrückwürfe bei der Symthetisierung originalgetreu wiederzugeben. Als Mittel dazu bietet sich ein in den letzten Jahren entwickeltes kopfbezogenes Stereoverfahren an.

2.1. Das Aufnahmeverfahren

Ausführliche Untersuchungen über das Richtungshören haben gezeigt, daß eine Richtungsempfindung allein durch die Schalldruckverläufe an beiden Trommelfellen des Hörers hervorgerufen wird. Es muß daher möglich sein, eine vollständig richtungstreue akustische Übertragung mit nur zwei Übertragungskanälen vorzunehmen, die natürlich dann auch mittels eines gewöhnlichen Stereo-Tonbandgerätes zu speichern ist. Auf der Wiedergabeseite ist dafür zu sorgen, daß an den Trommelfellen des Hörers genau die beiden Signale ankommen, die dort ankämen, wenn er sich am Aufnahmeort befände. Hierzu ist ein Aufnahmeverfahren erforderlich, das sicherstellt, daß keine notwendige Information verlorengeht, und ein Wiedergabeverfahren, bei dem durch eine entsprechende Vorverzerrung dafür gesorgt wird, daß auf dem Wege vom elektro-akustischen Wandler zum Trommelfell keine Richtungsinformation ausgelöscht, verfälscht oder hinzugefügt wird.

Mit der Entdeckung der richtungsbestimmenden Frequenzbänder zeigte J. BLAUERT (1969), wo die Richtungsinformation bei akustischen Signalen außer in Laufzeit- und Intensitätsunterschieden zwischen beiden Ohren steckt, nämlich in der spektralen Verfärbung der Signale. Eine derartige spektrale Verfärbung der von den Trommelfellen aufgenommenen Signale resultiert aus der Beugung am Kopf und aus der richtungsabhängigen Ankopplung der verschiedenen Resonanzen des

äußeren Ohres an das freie Schallfeld, wie sie von E.A.G. SHAW und R. TERANISHI (1968) nachgewiesen wurde. Weitere ausführliche Messungen der Richtungsabhängigkeit von Hörschwellen liegen von V. MELLERT (1972)[1] vor. Einen anschaulichen Beweis für die Bedeutung spektraler Eigenschaften für das Richtungshören stellt die Fähigkeit dar, auch bei unbewegtem Kopf für hinreichend breitbandige Signale eine spontane eindeutige Vorn-Hinten-Unterscheidung treffen zu können. Da bei Schalleinfall von vorn, wie auch von hinten, an beiden Ohren gleiche Signale ankommen, können es nur spektrale Unterschiede sein, die den Richtungseindruck hervorrufen.

Ein Aufnahmeverfahren, das in diesem Sinne richtungstreu arbeiten soll, muß also für beliebige Schalleinfallsrichtungen erstens die interauralen Laufzeit- und Intensitätsunterschiede exakt aufnehmen und zweitens die richtungsabhängige spektrale Verfärbung berücksichtigen. Die einfachste und naheliegendste Vorrichtung zur Realisierung dieser Eigenschaften stellt ein künstlich nachgebildeter Kopf (Kunstkopf) dar, in dessen Ohren zwei Mikrofone eingebaut sind, die die Schalldruckverläufe an den Trommelfellen aufnehmen. Ein solcher Kunstkopf wurde von P. DAMASKE und V. MELLERT entwickelt, und es zeigte sich, daß nur das äußere Ohr einschließlich Gehörgang und Impedanz des Trommelfells exakt nachgebildet werden müssen. Einzelheiten wie Nase, Haare usw. erwiesen sich als überflüssig. Bei allen in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen wurde ein von V. MELLERT (1972)[2] beschriebener Kunstkopf benutzt. Bei diesem wurden die geometrischen Abmessungen so gewählt, daß die einzelnen Resonanzen, die für verschiedene Personen etwas unterschiedlich liegen, einem Mittelwert über eine größere Anzahl von Personen entsprechen.

2.2. Das Wiedergabeverfahren

Bei einer Kunstkopfaufnahme stellen die beiden stereofon übertragenen Signale genau den Schalldruckverlauf dar, wie er an den Trommelfellen eines Hörers geherrscht hätte, wenn dieser sich an Stelle des Kunstkopfes am Aufnahmeplatz befunden hätte. Das Wiedergabeverfahren hat damit die Aufgabe, zwei elektrisch vorliegende Signale unverzerrt in Schalldruckverläufe an den Tommelfellen eines Hörers umzuwandeln, und zwar so, daß jedes der beiden Ohren nur eines der beiden Signale empfängt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, dies zu erreichen. Die beiden geläufigsten, die Wiedergabe über Kopfhörer und Lautsprecher, sollen im Folgenden besprochen werden.

2.2.1. Die Wiedergabe über Kopfhörer

Die Wiedergabe über Kopfhörer hat gegenüber derjenigen über Lautsprecher den Vorteil, daß ein Übersprechen zwischen linkem und rechtem Kanal nicht auftreten kann. Die folgenden Betrachtungen brauchen sich daher nur auf einen einzelnen Kanal zu beziehen.

Die einfache Annahme, daß Kunstkopfohrsignale direkt über Kopfhörer wiedergegeben beim Hörer eine der Aufnahme entsprechende Richtungsempfindung hervorrufen, erwies sich als nicht ganz zutreffend. Zwar werden Richtungen seitlich, hinten und oben korrekt wiedergegeben, aber gerade vordere Richtungen werden unter einem sehr großen Erhebungswinkel gehört. Diese Eigenschaft der Kopfhörerwiedergabe muß mit der Übertragung von der Wandlermembran zum Trommelfell zusammenhängen, die auch für den bekannten Effekt der Im-Kopf-Lokalisation verantwortlich ist, wie von P. LAWS (1972) gezeigt wurde. Für eine vollkommene Kopfhörerwiedergabe der Kunstkopfsignale ist es also erforderlich, ein Filter in die Übertragungskette einzuschalten, das invers zu der Übertragungsfunktion Kopfhörermembran-Trommelfell ist. Das

Wiedergabesystem läßt sich dann in folgender Weise beschreiben, wobei kleine Buchstaben immer Zeitfunktionen und große die dazugehörigen Fourier-Transformierten bedeuten.

Seien h(t) die Impulsantwort des Übertragungssystems Kopfhörereingangsklemme-Trommelfell, $\tilde{x}(t)$ das Kopfhörereingangssignal und y(t) das am Trommelfell ankommende Signal, so gelten im Zeit- und im Frequenzbereich folgende Beziehungen:

$$y(t) = h(t) * \tilde{x}(t) \qquad (2.1)$$

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot \tilde{X}(\omega) \qquad (2.1a)$$

(* bedeutet Faltung)

Beschreiben nun x(t) und $X(\omega)$ das Kunstkopfsignal, das an das Trommelfell gebracht werden soll, so sieht man sofort, wie $\tilde{x}(t)$ dafür zu wählen ist:

$$\tilde{x}(t) = g(t) * x(t) \qquad (2.2)$$

$$\tilde{X}(\omega) = G(\omega) \cdot X(\omega) \qquad (2.2a)$$

Hierbei ist g(t) die inverse Fourier-Transformierte von $G(\omega) = H^{-1}(\omega)$. Damit ein Filter mit einer solchen Impulsantwort g(t) und Übertragungsfunktion $G(\omega)$ realisiert werden kann, müssen verschiedene Bedingungen erfüllt sein; einmal darf $H(\omega)$ im interessierenden Frequenzbereich nicht verschwinden, außerdem muß g(t) bei geeignet gewähltem Zeitnullpunkt für negative Zeiten gleich Null sein. Setzt man die Existenzkriterien als erfüllt voraus, so gilt dann für g(t) und h(t)

$$h(t) * g(t) = \delta(t - t_o),$$

($\delta(t)$ - Dirac-Delta-Funktion)

wobei die zeitliche Verzögerung um t_o dadurch auftreten kann, daß man g(t) verzögern muß, um für negative Zeiten $g(t) = 0$ zu erhalten. Die Gleichungen (2.1) und (2.1a) gehen mit einem derartig gewählten $\tilde{x}(t)$ über in die gewünschten Beziehungen

$$y(t) = h(t) * g(t) * x(t) = \delta(t - t_o) * x(t) = x(t - t_o) \qquad (2.3)$$

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot G(\omega) \cdot X(\omega) = e^{j\omega t_o} \cdot X(\omega) \; . \qquad (2.3a)$$

Der Exponentialfaktor in (2.3a) repräsentiert die Verzögerung um t_o im Frequenzbereich.

2.2.2. Die Wiedergabe über Lautsprecher

Bei einer Wiedergabe der Kunstkopfsignale über Lautsprecher tritt das Problem des Übersprechens zwischen beiden Kanälen auf, da an jedem Ohr des Hörers Signale von beiden Lautsprechern empfangen werden. Die prinzipielle Behandlung dieses Problems ist bei M.R. SCHROEDER und B.S. ATAL (1963) zu finden.

Sei der in Fig. 1 dargestellte symmetrische Versuchsaufbau gegeben mit den Signalen $\tilde{l}(t)$ und $\tilde{r}(t)$ an den Laut-

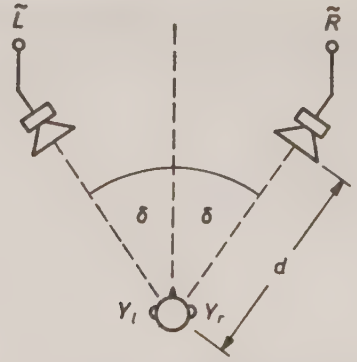

Fig. 1 Anordnung von Lautsprechern und Hörerplatz für die Wiedergabe von Kunstkopfsignalen

sprecherbuchsen, $y_l(t)$ und $y_r(t)$ an den Trommelfellen des Hörers und den Impulsantworten s(t) und a(t) der Übertragungen vom Lautsprecher zum zugewandten Ohr (s) und abgewandten Ohr (a) des Hörers. Für die Übertragung von den Lautsprecherklemmen zu den Trommelfellen gelten dann fol-

gende Gleichungen:

$$y_l(t) = s(t) * \tilde{l}(t) + a(t) * \tilde{r}(t)$$
$$y_r(t) = a(t) * \tilde{l}(t) + s(t) * \tilde{r}(t) \qquad (2.4)$$

bzw.

$$Y_l(\omega) = S(\omega) \cdot \tilde{L}(\omega) + A(\omega) \cdot \tilde{R}(\omega)$$
$$Y_r(\omega) = A(\omega) \cdot \tilde{L}(\omega) + S(\omega) \cdot \tilde{R}(\omega) \qquad (2.5)$$

Die beiden Gleichungen (2.5) lassen vektoriell zusammenfassen zu:

$$(Y_l, Y_r)^t = \begin{pmatrix} S & A \\ A & S \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{L} \\ \tilde{R} \end{pmatrix} \qquad (2.5a)$$

Für die Wiedergabe von Kunstkopfohrsignalen wird nun gefordert

$$(Y_l, Y_r) = (L, R) \quad , \qquad (2.6)$$

wobei mit $L(\omega)$ und $R(\omega)$ die Fourier-Transformierten der Signale vom linken und rechten Kunstkopfohr bezeichnet sind. Diese Bedingung läßt sich erfüllen, wenn man als Lautsprechereingangssignale geeignet transformierte, d.h. gefilterte, Signale (L,R) nimmt:

$$\begin{pmatrix} L \\ R \end{pmatrix} = (T) \cdot \begin{pmatrix} L \\ R \end{pmatrix} \qquad (2.7)$$

Durch Einsetzen von (2.7) in (2.5a) folgt, daß (T) die zu $\begin{pmatrix} S & A \\ A & S \end{pmatrix}$ inverse Matrix sein muß, um die Bedingung (2.6) zu erfüllen. Damit diese Inverse existiert, ist es erforderlich, daß die Determinante $(S^2 - A^2)$ im gesamten interessierenden Frequenzbereich nicht verschwindet. Die anschauliche Bedeutung dieser Voraussetzung ist, daß Frequenzkomponenten, die von einem Lautsprecher zu beiden Ohren in Betrag und Phase (modulo π) gleich übertragen werden, im Sinne von (2.6) am vom Lautsprecher abgewandten Ohr nicht kompensiert werden können. Falls die Determinante nicht verschwindet, gilt für (T):

$$(T) = \frac{1}{(S^2 - A^2)} \cdot \begin{pmatrix} S & -A \\ -A & S \end{pmatrix} \qquad (2.8)$$

Mit der Abkürzung

$$C(\omega) = -\frac{A(\omega)}{S(\omega)}$$

kann man (T) auch folgendermaßen schreiben:

$$(T) = \frac{1}{(1 - C^2)} \cdot \left(\frac{1}{S}\right) \cdot \begin{pmatrix} 1 & C \\ C & 1 \end{pmatrix} \qquad (2.8a)$$

Die an die Lautsprecher anzulegenden Signale $\tilde{L}(\omega)$ und $\tilde{R}(\omega)$ müssen dann mit (2.7) und (2.8a) aus den Kunstkopfsignalen $L(\omega)$ und $R(\omega)$ in folgender Weise gewonnen werden:

$$\begin{aligned} \tilde{L}(\omega) &= \frac{1}{(1 - C(\omega)^2)} \cdot \frac{1}{S(\omega)} \cdot (L(\omega) + C(\omega) \cdot R(\omega)) \\ \tilde{R}(\omega) &= \frac{1}{(1 - C(\omega)^2)} \cdot \frac{1}{S(\omega)} \cdot (R(\omega) + C(\omega) \cdot L(\omega)) \end{aligned} \qquad (2.9)$$

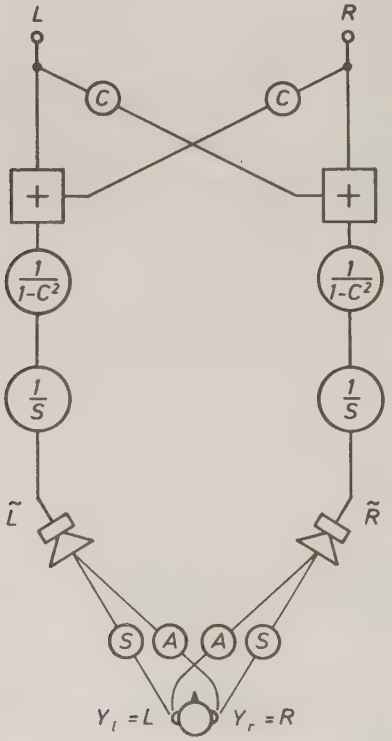

Fig. 2 Blockschaltbild für ein Lautsprecherwiedergabefilter für Kunstkopfsignale

In Fig. 2 ist das Blockschaltbild einer Schaltung angegeben, die eine derartige Filterung von $R(\omega)$ und $L(\omega)$ vornimmt.

Für eine Realisierung solch eines Filters muß ähnlich wie bei der Kopfhörerübertragung verlangt werden, daß die Impulsantworten der einzelnen Filter mit den Übertragungsfunktionen $(1 - C(\omega)^2)^{-1}$, $S(\omega)^{-1}$ und $C(\omega)$ für negative Zeiten verschwinden. Um dies zu erreichen, ist es auch hier wieder erlaubt, eine beliebige Zeitverzögerung t_o einzuführen.

Es sei hier noch darauf hingewiesen, daß diese rein algebraisch gefundenen Filter auch eine anschauliche Bedeutung haben. Das Filter $S(\omega)^{-1}$ ist erforderlich, um die zwischen dem Lautsprecher und dem zugewandten Ohr wirkende Übertragungsfunktion $S(\omega)$ aufzuheben. Durch das Filter $C(\omega) = -A(\omega)/S(\omega)$ im Querzweig wird das Signal, das z.B. über den linken Lautsprecher an das rechte Ohr gelangt, mit umgekehrtem Vorzeichen über den rechten Lautsprecher auch an das rechte Ohr gebracht, so daß das unerwünschte Übersprechsignal am rechten Ohr ausgelöscht wird. Dieses Kompensationssignal kommt nun aber auch wieder an das linke Ohr, und zwar insgesamt gefiltert mit einer Übertragungsfunktion $-C(\omega)^2$, weshalb das Kompensationssignal, das zusätzlich auf den linken Lautsprecher gegeben werden muß, mit $+C(\omega)^2$ gefiltert sein muß. Man sieht leicht, daß solch eine wechselseitige Kompensation durch Rückkopplungen in beiden Lautsprecherzweigen mit Filtern $+C(\omega)^2$ in den Rückkoppelschleifen zu erreichen ist. Die Übertragungsfunktionen dieser Rückkopplungsglieder ist aber gerade gleich der des dritten algebraisch gefundenen Filters, nämlich $1/(1 - C(\omega)^2)$.

2.3. Untersuchungen zur Realisierung der Wiedergabefilter

Ausgangspunkt für eine Realisierung der in den beiden vorigen Abschnitten besprochenen Wiedergabefilter für kopfbezogene Stereofonie sind die Übertragungsfunktionen $H(\omega)$ bei Kopfhörerwiedergabe und $S(\omega)$ und $A(\omega)$ bei Lautsprecherwiedergabe. Die Bestimmung dieser Funktionen und die Realisierung der Filter muß nach Betrag und Phase geschehen, um eine vollständig verzerrungsfreie Übertragung der Kunstkopfsignale zum Trommelfell zu erreichen. In der Form, wie H, S und A definiert sind, setzen sie sich jeweils aus zwei Komponenten zusammen. Diese sind erstens die Übertragungsfunktion des elektro-akustischen Wandlers, Kopfhörer oder Lautsprecher, und zweitens diejenige des Übertragungssystems Wandlermembran-Trommelfell. In diese gehen im Falle der Lautsprecherwiedergabe auch noch Eigenschaften des Wiedergaberaums ein. Die interessierenden Funktionen H, S und A lassen sich also nur für bestimmte Typen von Kopfhörer und Lautsprecher und für eine einzige Person messen; S und A außerdem auch nur für einen bestimmten Wiedergaberaum und einen festen Winkel, unter dem die Lautsprecher vor dem Hörerplatz aufgestellt sind. Die entsprechenden Einschränkungen gelten natürlich auch für aus H bzw. aus S und A entwickelte Filter.

Da die Filter im Rahmen dieser Arbeit zur Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen aus verschiedenen Konzertsälen zur Durchführung von Hörvergleichen dienen sollen, kann man sich leicht auf bestimmte Typen von Kopfhörer und Lautsprechern und auch auf eine bestimmte Anordnung im Wiedergaberaum festlegen. Letzterer ist ein reflexionsfreier Raum, für den die raumabhängigen Anteile von S und A sicher die einfachste Form annehmen, d.h. praktisch nicht vorhanden sind. Wichtig ist aber die Frage, ob für jeden einzelnen Hörer ein individuelles Filter erforderlich ist, da H, S und A, wie oben erwähnt, primär nur für eine bestimmte Person gemessen werden können. Die hörerabhängigen Anteile in H, S und A sind

die Ankopplung des Kopfhörers bzw. einer ebenen Welle aus Richtung der Lautsprecher an das Außenohr. In der Diskussion des Richtungshörens wurde oben aber bereits angeführt, daß sich die Übertragungseigenschaften des Außenohres zwischen verschiedenen Personen in der Regel nur sehr wenig unterscheiden. Zur Messung der Übertragungsfunktionen $H(\omega)$, $S(\omega)$ und $A(\omega)$ wird deshalb auch der Kunstkopf benutzt, und die Filter sollten für die meisten Hörer gut arbeiten.

2.3.1. Die Meßmethode

Die Übertragungsfunktionen $H(\omega)$, $S(\omega)$ und $A(\omega)$ werden mit einer Impulsmethode gemessen. Auf den Eingang des Wandlers, Kopfhörer oder Lautsprecher, wird ein Rechteckimpuls der Länge 25 µsek gegeben. Das Spektrum dieses Impulses hat eine konstante Phase und weicht von einem konstanten Betrag bei 10 kHz um -1 dB und bei 15 kHz um -2 dB ab, so daß er für elektro-akustische Zwecke hinreichend gut einen idealen Deltaimpuls ersetzt. Die von den Ohrmikrofonen des Kunstkopfes empfangenen Signale sind dann die Impulsantworten der Übertragungssysteme Kopfhörereingang-Trommelfell und Lautsprechereingang-Trommelfell. Diese Signale werden auf einen Analog-Digital-Wandler gegeben, der an einen Digital-Rechner angeschlossen ist. Auf der digitalen Seite hat dieser Wandler eine Auflösung von zwölf binären Stellen, was einer Dynamik von mehr als 66 dB entspricht. Die Sampling-Rate bei der Digitalisierung beträgt 40 kHz. Dadurch bleibt die Information bis zur Nyquist-Frequenz von 20 kHz im digitalisierten Signal erhalten. Die Impulsantworten, die nach maximal 10 msek auf Null abgeklungen sind, werden auf 2^{12}, also 4096 Samples durch Nullen ergänzt, und mit diesen Daten wird eine Fast-Fourier-Transformation (FFT)[+] durchgeführt. Dadurch erhält man ein komplexes Linienspektrum, also eine

[+] Die Zitate zur Fast-Fourier-Transformation und zu digitalen Filtern sind am Schluß der Literaturnachweise zu sammengestellt.

gesampelte Übertragungsfunktion aus 2048 äquidistanten komplexen Spektrallinien, dazu noch den Gleichanteil des Signals. Die 2048 Spektrallinien überdecken den Bereich von 0 Hz bis 20 kHz, was einen Linienabstand von 9,77 Hz ergibt. Die Übertragungsfunktionen können digital auf Magnetband oder Magnetplatte gespeichert und später numerisch verarbeitet werden.

2.3.2. Das Filter für Kopfhörerwiedergabe

Die Messungen für ein Kopfhörerfilter werden mit Kopfhörern vom Typ Sennheiser HD 414 durchgeführt. Der Kopfhörer wird dem Kunstkopf aufgesetzt, und die Impulsantwort des Systems Kopfhörereingangsklemme-Trommelfell (hier genau -Kunstkopfohrmikrofon) wird in der oben beschriebenen Weise aufgenommen und digital abgespeichert. In Fig. 3 ist der Verlauf von h(t) in willkürlichem Amplitudenmaßstab dargestellt. Die einzelnen Sample-Punkte

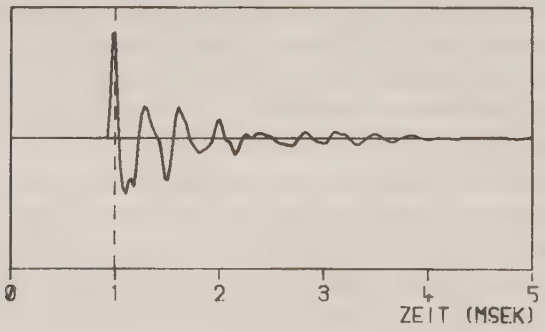

Fig. 3 Die Impulsantwort des Übertragungssystems Kopfhörereingang-Kunstkopfohrmikrofon

sind bei dieser Art der Darstellung miteinander verbunden, so daß ein oszillographenartiges Bild des Kurvenverlaufs

entsteht. Der Kurvenverlauf von 5 msek ist aus 200 Samples zusammengesetzt. Die senkrechte gestrichelte Linie gibt den Zeitnullpunkt an, auf den bei der Darstellung des Spektrums die Phase bezogen ist. Mittels einer FFT erhält man aus dieser Impulsantwort die Übertragungsfunktion $H(\omega)$ in Fig. 4.

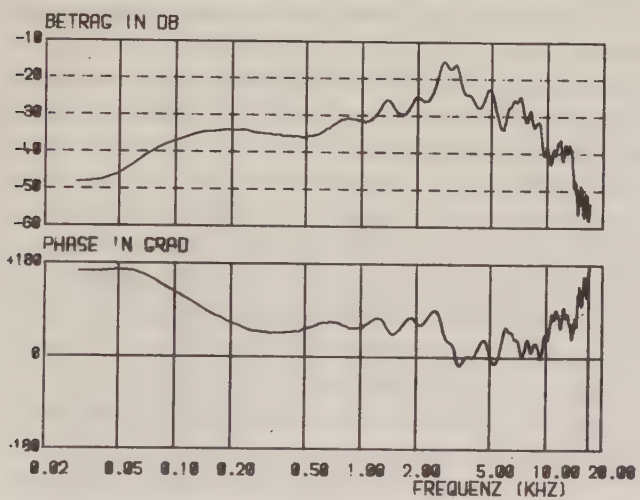

Fig. 4 Die Übertragungsfunktion $H(\omega)$

Auch hier sind wieder die Sample-Punkte durch eine Kurve verbunden. Wegen der logarithmischen Frequenzskala liegen die Punkte bei höheren Frequenzen immer dichter. Die absoluten Werte der dB-Skala für den Betrag sind abhängig von der Normierung der digitalisierten Daten im Rechner. Die Zahlenwerte sind daher außer im Falle des Quotienten zweier Übertragungsfunktionen nicht relevant. Da der Phasenwinkel nur im Bereich $\pm 180^{o}$ dargestellt wird und grundsätzlich alle Punkte miteinander verbunden werden, kann es zu scheinbaren Unstetigkeiten kommen, die aber nur ein stetiges Überschreiten des Wertes $+180^{o}$ oder -180^{o} sind.

Die Darstellungen von $h(t)$ und $H(\omega)$ in Fig. 3 und 4 zeigen eine starke Abweichung vom idealen Deltaimpuls bzw. von

einer konstanten Übertragungsfunktion. Es ist daher nicht verwunderlich, daß bei einer Wiedergabe von Kunstkopfsignalen über ein derartiges Übertragungssystem Richtungsinformation verfälscht wird, die nach J. BLAUERT (1969) und V. MELLERT (1972)[1] in ähnlichen Schwankungen des Frequenzganges zu suchen ist, wie $H(\omega)$ sie aufweist. Die erste Bedingung für die Existenz eines Filters mit der Übertragungsfunktion $G(\omega) = 1/H(\omega)$, die Nullstellenfreiheit von $H(\omega)$ im interessierenden Frequenzbereich, ist im dargestellten Bereich von 30 Hz bis 17 kHz erfüllt. Als interessierender Frequenzbereich soll im Weiteren das Intervall 100 Hz - 12,5 kHz verstanden werden.

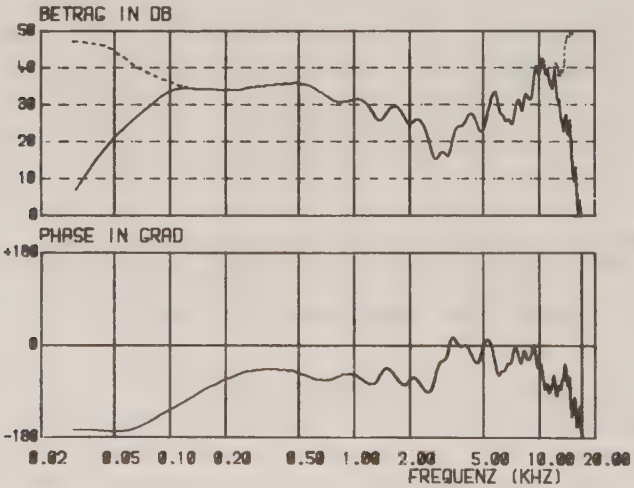

Fig. 5 Die Übertragungsfunktion $1/H(\omega)$, bandbegrebzt von 100 Hz bis 12,5 kHz

In Fig. 5 ist die Übertragungsfunktion $G(\omega) = 1/H(\omega)$ dargestellt. Der Betrag ist darin schon durch einen Bandpaß von 100 Hz bis 12,5 kHz begrenzt worden. Der gestrichelte Kurvenverlauf bei hohen und tiefen Frequenzen zeigt, wie eine nicht bandbegrenzte Funktion $G(\omega)$ verläuft. Die dabei auftretenden Anhebungen der Tiefen und Höhen rühren von der Bandbegrenzung der elektro-akustischen Übertragung Kopfhörer-Ohr her, die natürlich nicht ausgeglichen werden kann.

Die Realisation eines derartigen Filters ist auf verschiedene Weisen möglich. Für die praktische Anwendung am günstigsten ist ein Filter, das als "schwarzer Kasten" in Echtzeit, eventuell nur mit einer gewissen Verzögerung, aus dem Kunstkopfsignal am Eingang ein entsprechend $G(\omega)$ gefiltertes Ausgangssignal macht. Dieses kann dann zur Wiedergabe auf den Kopfhörer gegeben werden. Diese Arbeitsweise besitzt typischerweise ein analoges Filter aus konzentrierten Schaltelementen. Allerdings ist es keinesfalls einfach, ein Analogfilter zu konstruieren, das einen so komplizierten Verlauf der Übertragungsfunktion besitzt, wie $G(\omega)$ ihn zeigt. Hierbei müßten sicher Vereinfachungen am Frequenzgang vorgenommen werden. Wie weit diese erlaubt sind und wie ein derartiges analoges Filter aussehen müßte, soll in dieser Arbeit nicht untersucht werden. Die Messungen von P. LAWS (1972) zur Im-Kopf-Lokalisation zeigen, daß ein solches Filter auch mit hinreichender Berücksichtigung der Phase gebaut werden kann. Da die Übertragungsfunktionen digital vorliegen und die zu filternden Signale ebenso wie die Impulsantworten digitalisiert werden können, soll eine digitale Realisierung der Filter besprochen werden.

Es gibt zwei Typen von digitalen Filtern. Die rekursiven Filter gehen aus von einer gebrochen rationalen Darstellung der Übertragungsfunktion als Funktion der transformierten Kreisfrequenz:

$$G(\omega) = G(z(\omega)) = \frac{A(z)}{B(z)} = \frac{\sum_{i=0}^{N} a_i \cdot z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^{M} b_i \cdot z^{-i}} \qquad (2.10)$$

mit

$$z(\omega) = e^{j\omega/\nu_0}\ ,\quad j = \text{imaginäre Einheit},\quad \nu_0 = \text{Nyquist-Frequenz}$$

Liegt dann eine Folge x_n als digitalisierte Eingangsfunktion vor, so läßt sich die Ausgangsfolge y_n durch folgende Formel errechnen:

$$y_n = \sum_{i=0}^{N} a_i \cdot x_{n-i} - \sum_{i=1}^{M} b_i \cdot y_{n-i} \qquad (2.11)$$

Durch geeignet optimalisierte Rechenverfahren lassen sich derartige Filter bei bekannten Koeffizienten a_i und b_i mit hinreichend schnellen digitalen Rechenwerken als Echtzeitfilter bauen. Ein solches System mit Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandlern als Ein- und Ausgang arbeitet dann ähnlich wie ein analoges Filter als "schwarzer Kasten", der in die Übertragungskette eingeschaltet werden kann. Die Schwierigkeit bei der Realisierung eines Filters mit einer Übertragungsfunktion, wie sie z.B. in $G(\omega) = 1/H(\omega)$ vorgegeben ist, stellt sich im Auffinden der Polynomdarstellung (2.10). Hierbei müssen numerische Approximationsverfahren angewendet werden, um eine hinreichend gute Annäherung der gegebenen Übertragungsfunktion zu bekommen. Wichtig ist dann aber auch, daß die Grade von Zähler- und Nennerpolynom, N und M, nicht zu groß werden. Wie man aus (2.11) entnehmen kann, ist die Summe N+M ein Maß für die Anzahl von arithmetischen Operationen, die für die Berechnung eines Ausgangswertes y_n erforderlich sind. Bei einer Samplingfrequenz von z.B. 40 kHz müssen diese Operationen innerhalb einer Rechenzeit von 25 usek ablaufen. Üblicherweise sind rekursive digitale Filter mit bis zu insgesamt ca. 20 Koeffizienten als Echtzeitfilter auf programmierbaren Rechnern zu realisieren.

Eine zweite Art von digitalen Filtern sind die nicht-rekursiven Filter, bei denen die Koeffizienten b_i des Nennerpolynoms alle gleich Null sind. Die Gleichung (2.11) geht dann über in

$$y_n = \sum_{i=0}^{N} a_i \cdot x_{n-i} \; . \qquad (2.12)$$

Der zweite, eine Art Rückkopplung darstellende Term in (2.11) fällt also fort, und es bleibt eine Summe stehen, die eine Faltung der Eingangsfolge x_n mit einer endlichen aus den N+1 Samples a_i bestehenden Impulsantwort darstellt. Eine

derartige Impulsantwort erhält man ohne irgendwelche Approximationsverfahren durch Berechnung der invers Fourier-Transformierten zur gegebenen Übertragungsfunktion. Diese Berechnung geschieht mittels einer FFT. Die Zahl N hängt dann von der Form der so gewonnenen Impulsantwort ab; es kommt darauf an, nach wieviel Samples diese auf Null abgeklungen ist. In Fig. 6 ist die rücktransformierte Impulsantwort g(t) zu $G(\omega) = 1/H(\omega)$ dargestellt. Man sieht, daß sie wie h(t) in Fig. 3 nach ca. 3 msek, d.h. nach 120 Samples, abgeklungen ist. Damit ist N aber auch viel zu groß, um $G(\omega)$ als nicht-rekursives digitales Filter im Zeitbereich nach (2.12) in Echtzeit arbeiten zu lassen. Es gibt aber hier noch

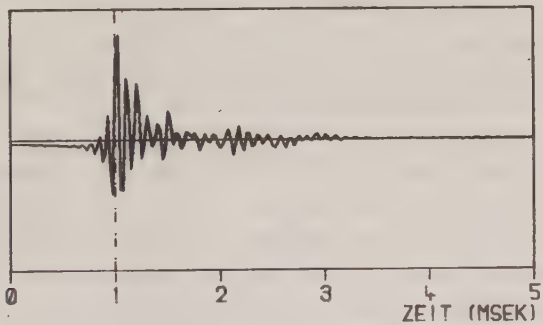

Fig. 6 Impulsantwort des Kopfhörer-wiedergabefilters

die Möglichkeit, die nicht-rekursive Filterung im Frequenzbereich durchzuführen. Auch wenn dabei nicht so große Rechengeschwindigkeiten erreicht werden können, daß das Filter in Echtzeit arbeiten kann, so sind doch Rechenzeiten pro Ausgangssample zu erhalten ,die erheblich unter denen bei einer Faltung nach (2.12) liegen. Für diese Faltung im Frequenzbereich muß man die Eingangsfolge x_n in bestimmte Teilfolgen zerlegen, die man mittels einer FFT in den Frequenzbereich transformiert. Die eigentliche Faltung geschieht dann durch Multiplikation der Fourier-Transformierten der Teilfolgen mit der Übertragungsfunktion, hier als $G(\omega)$. Durch

das richtige Herausschneiden der Teilfolgen aus der Eingangsfolge und durch Anhängen von Nullen an die Teilfolgen ist sicherzustellen, daß die aus dem Produkt von Übertragungsfunktion und Fourier-Transformierten der Eingangsteilfolgen mittels inverser FFT zu erhaltenden Ausgangsteilfolgen sich exakt zur vollständigen Ausgangsfolge y_n aneinandersetzen lassen. Diese Art der Realisierung eines nicht-rekursiven digitalen Filters, die sich der Fast-Fourier-Transformation bedient, wird auch Fast-Convolution genannt.

In Abschnitt 2.2.1. war neben der Nullstellenfreiheit von $H(\omega)$ noch als Realisierungsbedingung für ein Filter $1/H(\omega)$ gefordert, daß $g(t)$ für negative Zeiten gleich Null ist. Bei der Lage des Zeitnullpunktes in Fig. 6 (senkrechte gestrichelte Linie), auf den die Phase in Fig. 5 bezogen ist, ist diese Bedingung zwar noch nicht erfüllt; aber durch Multiplikation der Übertragungsfunktion in Fig. 5 mit $e^{-j\omega t_o}$, z.B. $t_o = 2$ msek , läßt sich auch diese Bedingung erfüllen. Man kann feststellen, daß ein Filter mit der Übertragungsfunktion $G(\omega) = 1/H(\omega)$ nicht-rekursiv digital nach der Methode der Fast-Convolution realisierbar ist. Dieses Filter invertiert im Bereich zwischen 100 Hz und 12500 Hz die Übertragungsfunktion des Systems Kopfhörereingang-Kunstkopfmikrofon nach Betrag und Phase. Über dieses Filter ist eine Kopfhörerwiedergabe von Kunstkopfaufnahmen möglich, die eine vollständig richtungstreue Reproduktion des Höreindruckes hervorruft, den der Hörer am Platz des Kunstkopfes bei der Aufnahme gehabt hätte.

2.3.3. Das Filter für Lautsprecherwiedergabe

Die Überlegungen, die zu dem durch Gleichung (2.9) beschriebenen Filter für die Lautsprecherwiedergabe von Kunstkopfsignalen geführt haben, gehen von einem symmetrischen Aufbau nach Fig. 1 aus. In diese Symmetrie ist auch die Gleichheit der beiden Lautsprecher eingeschlossen. Bei den beiden Lautsprechern, mit denen die folgenden Messungen und auch

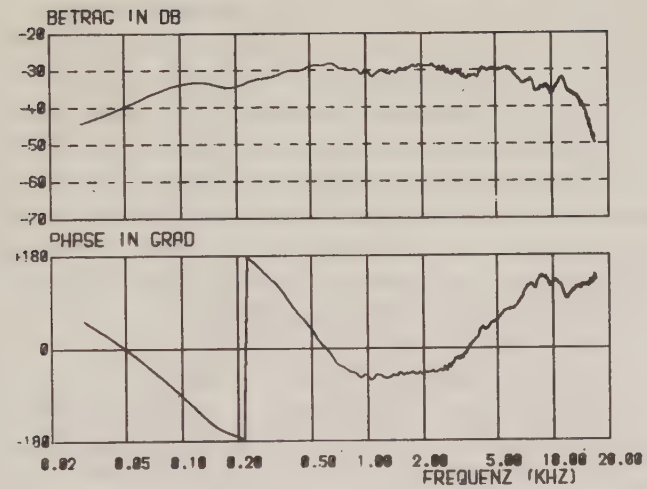

Fig. 7 Frequenzgang eines der beiden Wiedergabelautsprecher

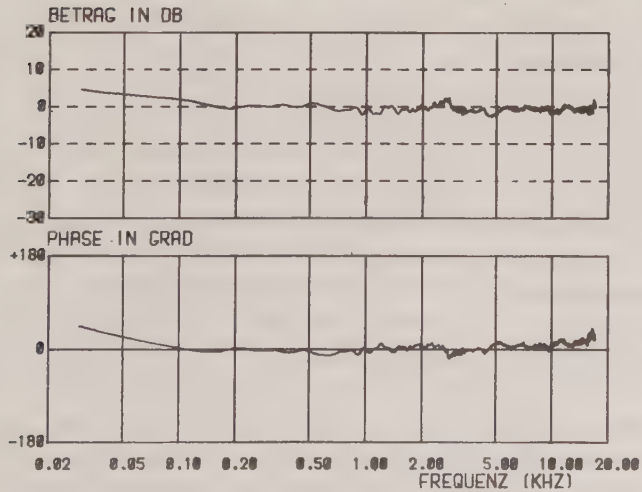

Fig. 8 Unterschied zwischen den Frequenzgängen der beiden Wiedergabelautsprecher

die Hörversuche durchgeführt werden, handelt es sich um ein Paar vom Typ Klein+Hummel OY mit eingebauten Endverstärkern, die auf möglichst identische Übertragungseigenschaften hin ausgesucht sind. Fig. 7 zeigt den Frequenzgang eines der beiden Lautsprecher, aufgenommen in einem reflexionsfreien Raum nach der Impulsmethode, wobei die Impulsantworten im Abstand von 2,60 m vor dem Lautsprecher über ein Kondensatormikrofon mit völlig glattem Frequenzgang aufgenommen ist. Der komplexe Quotient der beiden Lautsprecherübertragungsfunktionen ist in Fig. 8 dargestellt. Man sieht, daß im Bereich 100 Hz bis 17 kHz praktisch keine Unterschiede zwischen den beiden Lautsprechern bestehen.

Für die Hörversuche sind die Lautsprecher und der Hörerplatz gemäß Fig. 1 mit $\delta = 36^{\circ}$ und d = 2,60 m im reflexionsfreien Raum aufgebaut. Zur Messung von $S(\omega)$ und $A(\omega)$ wird der Kunstkopf mit "Blickrichtung" zum Mittelpunkt der Verbindungslinie zwischen den Lautsprechern an den Hörerplatz gestellt, und auf einen der beiden Lautsprecher wird der 25-µsek-Impuls gegeben. Über das dem eingeschalteten Lautsprecher zugewandte Ohr wird s(t) aufgenommen; dann wird der Impuls auf den anderen Lautsprecher gegeben und a(t) am selben Ohr wie zuvor s(t) aufgenommen. Die Aufnahme von s(t) und a(t) muß in dieser Weise nacheinander geschehen, da die zur Verfügung stehende Rechenanlage nur über einen Analog-Digital-Wandler als Eingang verfügt. Der Rechner faßt bei den Impulsantworten zunächst immer das absolute Maximum des Signals als Zeitnullpunkt auf; daher muß die Laufzeitdifferenz zwischen s(t) und a(t) bei zweiohrigem Betrieb des Kunstkopfes analog mit einem Oszillographen gemessen und in den Rechner eingegeben werden. Dort wird die Verzögerung in das digitalisierte Signal a(t) hineingerechnet. In Fig. 9 sind die beiden Impulsantworten s(t) und a(t) gemeinsam aufgetragen. Der Amplitudenmaßstab ist für beide Signale gleich, die Verzögerung von a(t) gegenüber s(t) beträgt 290 usek. Die aus s(t) und a(t) durch eine FFT berechneten Übertragungsfunktionen $S(\omega)$ und $A(\omega)$ sind in Fig. 10 a und b dargestellt.

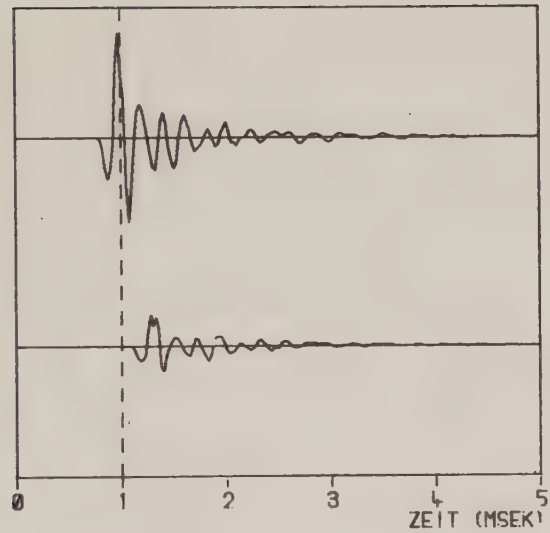

Fig. 9 Die Impulsantworten s(t) und a(t)

Als erstes wird $S(\omega)$ invertiert. Ebenso wie bei $G(\omega)$ im vorigen Abschnitt wird $1/S(\omega)$ auf den Frequenzbereich 100 Hz bis 12,5 kHz begrenzt. Fig. 11 zeigt den Verlauf von $1/S(\omega)$. Bei 10 kHz gibt es hier einige dicht beieinander liegende sehr schmale Maxima im Betrag, die etwa um 5 dB aus dem mittleren Verlauf der Kurve herausragen. Diese Maxima erzeugen bei der rücktransformierten Impulsantwort zu $1/S(\omega)$ in Fig. 12 einen abklingenden schwebungsartigen Verlauf mit ca. 10 kHz Trägerfrequenz. Da die Impulsantwort aber trotzdem hinreichend schnell abklingt, läßt sich $1/S(\omega)$ als nicht-rekursives digitales Filter mittels einer Fast-Convolution realisieren.

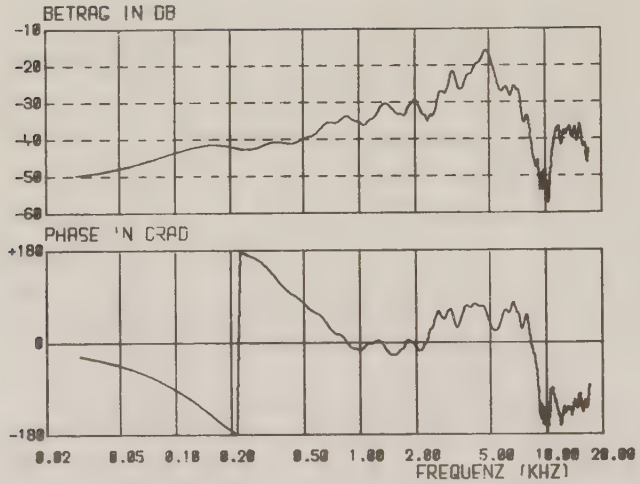

Fig. 10 a Die Übertragungsfunktion S(ω)

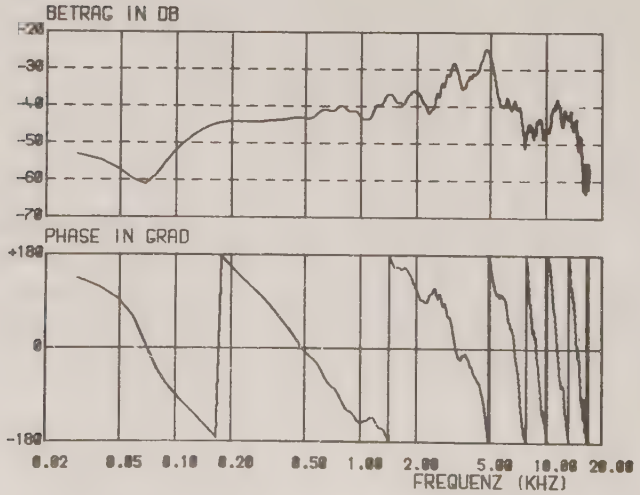

Fig. 10 b Die Übertragungsfunktion A(ω)

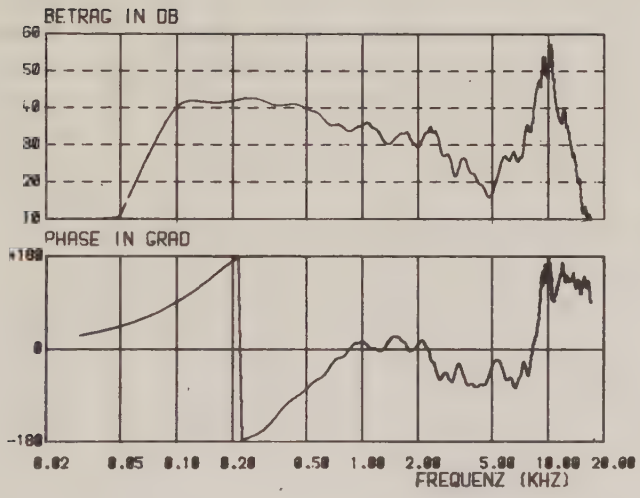

Fig. 11 Die Übertragungsfunktion 1/S(ω), band-begrenzt von 100 Hz bis 12,5 kHz

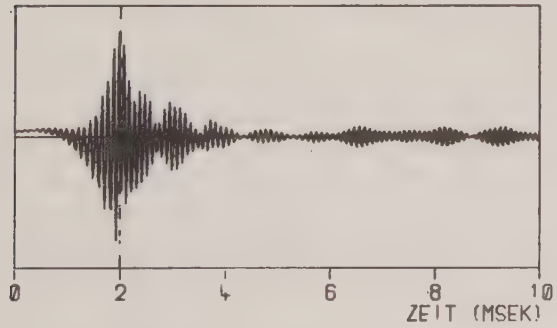

Fig. 12 Impulsantwort zur Übertragungsfunktion 1/S(ω)

In mehreren Rechenschritten werden nun $C(\omega) = -A(\omega)/S(\omega)$, begrenzt auf 100 Hz bis 12,5 kHz, und $1/(1-C(\omega)^2)$ berechnet. Die Übertragungsfunktionen mit den dazugehörigen Impulsantworten sind in Fig. 13 bis 16 dargestellt. Auch bei c(t) zeigt sich wegen mehrerer dicht beieinander liegender Maxima im Betrag von $C(\omega)$ der schwebungsartige Verlauf der Impulsantwort. Da $1/(1-C^2)$ keine Singularitäten zeigt, kann man schließen, daß $C(\omega)^2$ im interessierenden Frequenzbereich nirgends zugleich den Betrag Eins und die Phase Null hat.

Die Realisierung des Lautsprecherfilters nach Fig. 2 durch ein nicht-rekursives Filter erfolgt, ähnlich wie es beim Kopfhörerfilter beschrieben wurde, durch Multiplikation von Übertragungsfunktionen mit Fourier-Transformierten bestimmter Teilfolgen der Eingangsfolgen l_n und r_n, die die digitalisierten Kunstkopfsignale l(t) und r(t) bezeichnen sollen. Auch die Addition von Signalen, die innerhalb des Filters nötig ist, läßt sich wegen der Linearitätseigenschaften der Fourier-Transformation im Frequenzbereich durchführen. Die Rechenoperationen bei der Faltung eines Paares von Eingangsteilfolgen aus l_n und r_n laufen nach Transformation der Zeitfolgen inden Frequenzbereich mittels FFT entsprechend den Gleichungen (2.9) ab. Es ist dazu noch zu bemerken, daß $1/(1-C^2)$ und $1/S$ sinnvollerweise zusammengefaßt werden. Außerdem müßten an mehreren Stellen Zeitverzögerungen in das Filter eingebaut werden, um die Impulsantworten der Teilfilter für negative Zeiten den Wert Null zu geben. Diese Verzögerungen lassen sich aber auch zu einer einmaligen Verzögerung der beiden Eingangssignale zusammenfassen; diese kann bereits vor Beginn der eigentlichen Rechnung durch entsprechend versetztes Abspeichern der Eingangsteilfolgen in den Arbeitsspeicher des Rechners geschehen, mit dem die digitale Filterung vorgenommen wird.

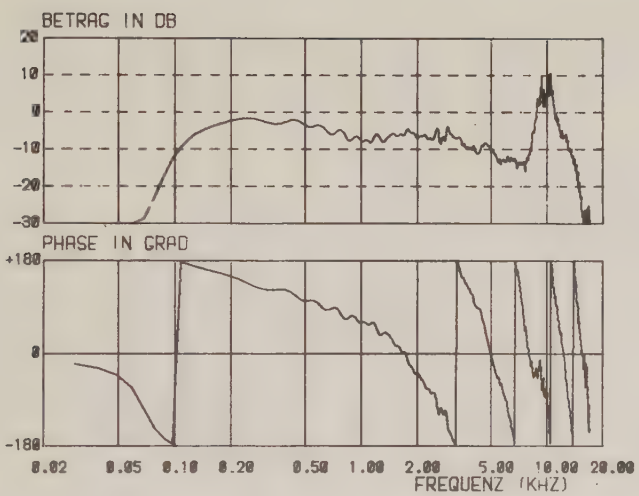

Fig. 13 Übertragungsfunktion $C(\omega) = -A(\omega)/S(\omega)$

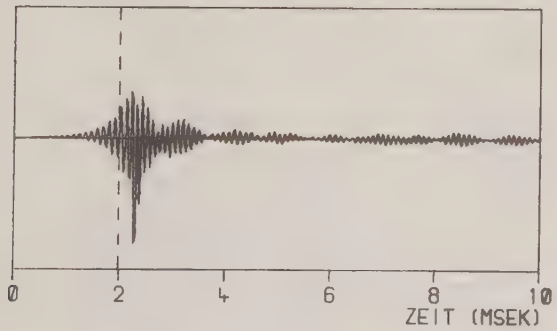

Fig. 14 Impulsantwort zur Übertragungsfunktion $C(\omega)$

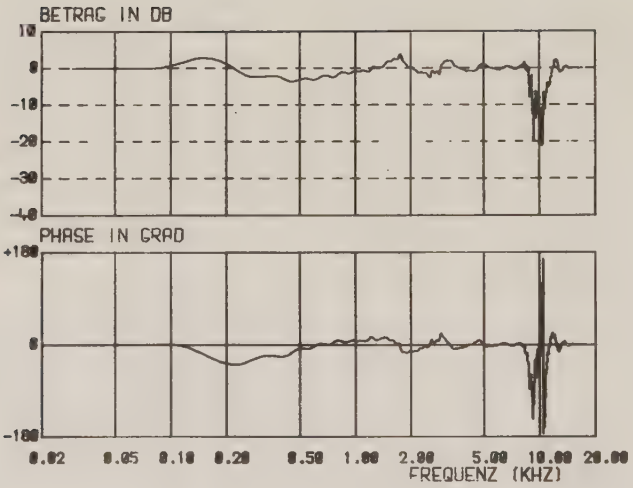

Fig. 15 Übertragungsfunktion $1/(1 - C(\omega)^2)$

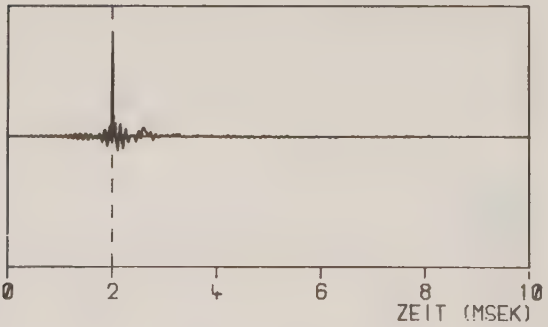

Fig. 16 Impulsantwort zur Übertragungsfunktion $1/(1 - C^2)$

Zur Überprüfung der Arbeitsweise eines derartigen Filters wird im Rechner eine Übertragung simuliert, bei der ein Signal auf nur einen der beiden Filtereingänge gegeben wird. Dieses Signal liegt dann an den beiden Ausgängen gemäß den Übertragungsfunktionen

$$\frac{1}{S(\omega)\cdot(1 - C(\omega)^2)} \quad \text{und} \quad \frac{C(\omega)}{S(\omega)\cdot(1 - C(\omega)^2)}$$

gefiltert vor. Sei mit T_1 die Übertragungsfunktion zwischen einem Filtereingang und dem zugewandten Ohr bezeichnet, d.h. dem Ohr, an dem das unverzerrte Signal ankommen soll, und entsprechend mit T_2 diejenige zwischen Filtereingang und abgewandten Ohr, an dem kein Signal ankommen soll. Diese beiden Übertragungsfunktionen lauten dann folgendermaßen:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{S\cdot(1 - C^2)} \cdot S + \frac{C}{S\cdot(1 - C^2)} \cdot A \\ T_2 &= \frac{1}{S\cdot(1 - C^2)} \cdot A + \frac{C}{S\cdot(1 - C^2)} \cdot S \end{aligned} \qquad (2.13)$$

Setzt man für S und A die Übertragungsfunktionen S und A ein, aus denen das Filter entwickelt wurde, so erhält man trivialerweise die gewünschten Beziehungen

$$T_1 = 1 \quad \text{und} \quad T_2 = 0 .$$

Dieses Vorgehen ist aber nicht sehr realistisch, da S und A im Grunde für jeden Hörer etwas unterschiedlich sind. Es werden daher in einem erneuten Aufbau des Kunstkopfes am Hörerplatz vor den Lautsprechern die Übertragungsfunktionen aufgenommen, wobei die Justierung des Kunstkopfes nicht exakter und sorgfältiger durchgeführt wird, als ein Hörer seinen Kopf auf der Symmetrieachse halten würde. Mit diesen S und A erhält man die in Fig. 17 und 18 dargestellten Übertragungsfunktionen T_1 und T_2. Fig. 17 zeigt für T_1 einen glatten Frequenzgang bis ca. 7 kHz und darüber auch nur geringfügige Schwankungen. Aus Fig. 18 geht dagegen hervor, daß zwischen 200 Hz und ca. 8 kHz eine Kompensation des unerwünschten Signals am abgewandten Ohr von mehr als -20 dB

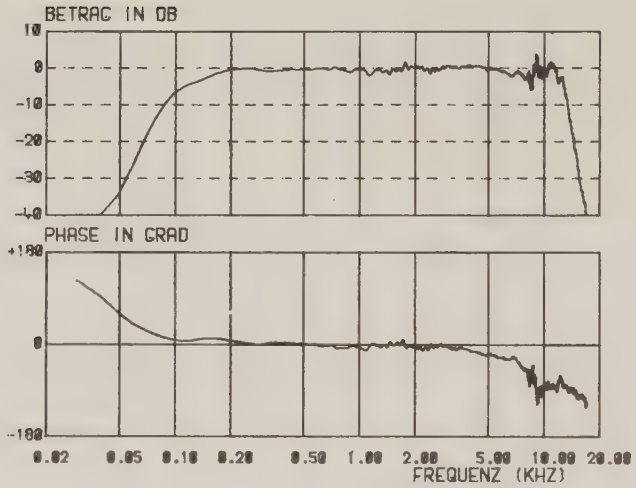

Fig. 17 Übertragungsfunktion vom Filtereingang zum zugewandten Ohr

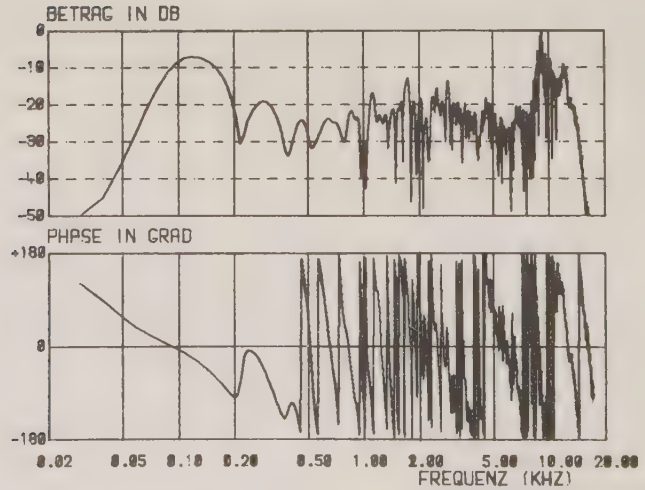

Fig. 18 Übertragungsfunktion vom Filtereingang zum abgewandten Ohr

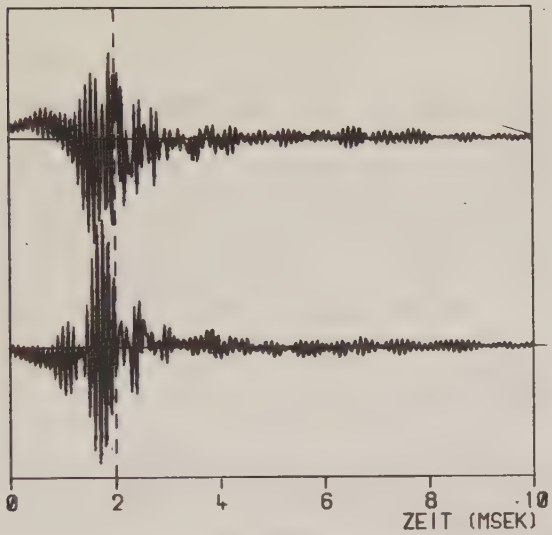

Fig. 19 Impulsformen an den Filterausgängen bei einem Deltaimpuls an einem Eingang

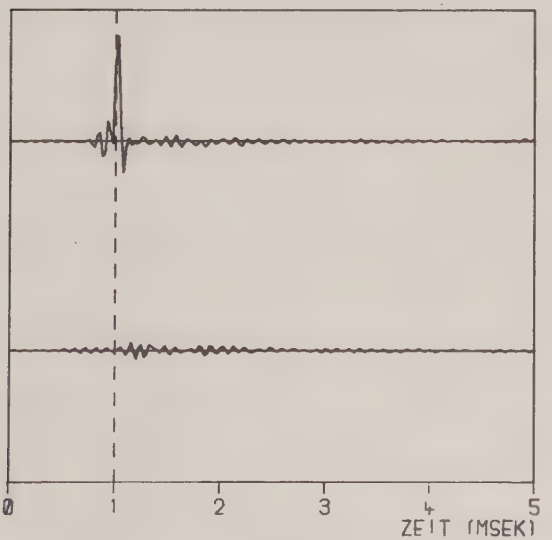

Fig. 20 Impulsformen an den Kunstkopfohrmikrofonen bei einem Deltaimpuls an einem Filtereingang

erreicht wird. Wenn man als Filtereingangssignal einen Deltaimpuls annimmt, so erhält man die Impulsformen an den Filterausgängen und an den Trommelfellen durch Rücktransformation der entsprechenden Übertragungsfunktionen in den Zeitbereich. Die in dieser Weise gewonnenen Impulsformen sind in Fig. 19 für die Filterausgänge und in Fig. 20 für die beiden Trommelfelle des Kunstkopfs dargestellt. Bei jeweils gleichem Amplitudenmaßstab sieht man in Fig. 20 ganz deutlich, daß an einem Ohr ein fast unverzerrter Impuls ankommt, während das anderer Ohr praktisch kein Signal empfängt.

2.3.4. Das praktisch verwendete Filter

Wegen der noch nicht vollständigen Ausrüstung der für diese Untersuchung zur Verfügung stehenden Rechenanlage mit Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandlern können die in den beiden vorigen Abschnitten besprochenen Filter noch nicht in digitaler Form eingesetzt werden. Die Hörversuche werden durchgeführt mit einem von P. DAMASKE (1971) beschriebenen analogen Filter, bestehend aus passiven Netzwerken und einer Laufzeitkette zur Realisierung der Übertragungsfunktionen $C(\omega)$ und $1/S(\omega)$. Das Teilfilter $1/(1-C^2)$ ist in diesem Filter nicht vorhanden, da seine Realisation sehr kompliziert ist und es bis zu ca. 7 kHz praktisch keine Wirkung hat (s. Fig. 15). In Fig. 21 und 22 sind die mit diesem Filter und dem Kunstkopf am Hörerplatz aufgenommenen Übertragungsfunktionen am zugewandten und abgewandten Ohr dargestellt. Der Quotient aus beiden gibt das Maß für die Kompensation an und ist in Fig. 23 aufgetragen. Man sieht, daß die Auslöschung am abgewandten Ohr fast nur zwischen 10 und 15 dB liegt und der Verlauf der Übertragungsfunktionen nicht gerade als ideal bezeichnet werden kann. Trotzdem rechtfertigen die subjektiven Richtungshörversuche über dieses Filter, wie sie z.B. von DAMASKE beschrieben sind, den vorläufigen Einsatz dieses Filters bei den vergleichenden Untersuchungen von Konzertsälen.

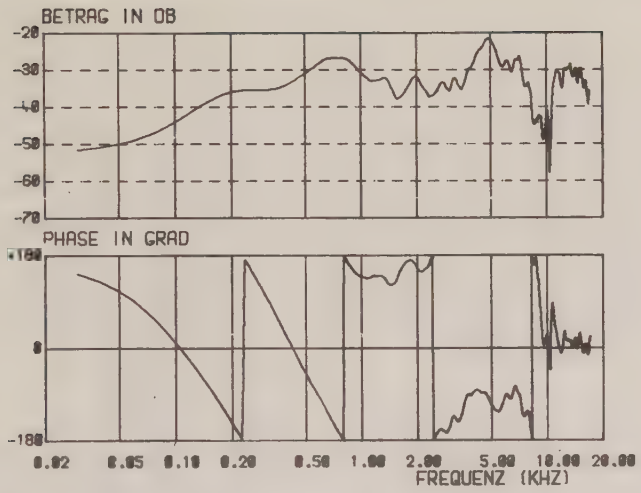

Fig. 21 Die Übertragungsfunktion T_1, gemessen mit dem praktisch verwendeten Filter

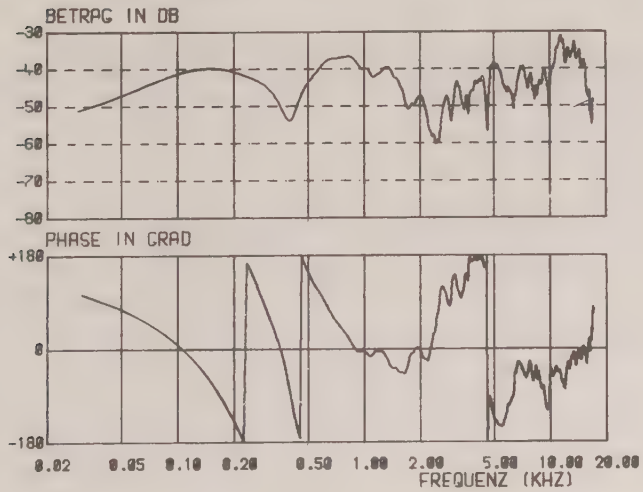

Fig. 22 Die Übertragungsfunktion T_2, gemessen mit dem praktisch verwendeten Filter

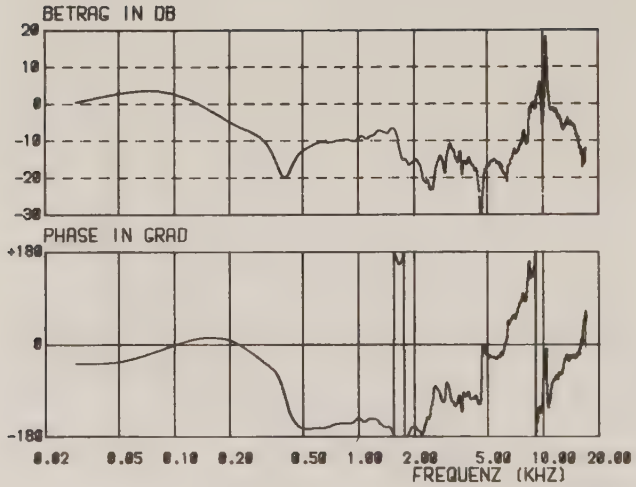

Fig. 23 Kompensation des praktisch verwendeten Filters für Lautsprecherwiedergabe (T_2/T_1)

3. Das Auswertungsverfahren für die subjektiven Hörvergleiche

Will man eine Anzahl von Objekten durch eine Gruppe von Versuchspersonen subjektiv beurteilen lassen, und soll das Ergebnis dieser Beurteilungen quantitativ dargestellt werden, so ist es zunächst erforderlich, eine Fragestellung zu formulieren, die geeignet ist, auswertbare Information von den urteilenden Personen zu erhalten. Im Gegensatz zu objektiven Messungen, bei denen durch die Meßmethode eindeutig feststeht, was für Daten man mißt, können bei subjektiven Untersuchungen schon durch die verbale Form der Fragestellung die erhaltenen Daten in unkontrollierbarer Weise verfälscht sein.

Als nächstes ist ein möglichst anschauliches Modell zu entwerfen, das die Denkmechanismen bei der subjektiven Beurteilung beschreiben und das Zustandekommen der Rohdaten erklären kann. Aus den Rohdaten müssen dann mittels einer rechnerischen Analyse die Parameter des Modells errechnet werden.

Bei den verglichenen Objekten handelt sich im Rahmen dieser Arbeit konkret um Schallfelder an bestimmten Plätzen in Konzertsälen während der Wiedergabe eines Musikstückes über Lautsprecher auf der Bühne. Da in der Regel vergleichbare Plätze in verschiedenen Sälen miteinander verglichen werden, sollen in diesem Kapitel die Objekte der Kürze halber als 'Säle' bezeichnet werden. Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der Symbole, die bei der Erläuterung des Auswertungsverfahrens für die subjektiven Daten verwendet werden. In Tabelle 2 sind einige wichtige elementare Formeln zur statistischen Behandlung von Datenfolgen zusammengestellt. Dabei seien a_n und b_n ($n = 1, \ldots, N$) zwei Zahlenfolgen.

Tabelle 1:

Symbol	Beschreibung
N_s	Anzahl der Säle in einer Untersuchungsreihe
N_p	" " Versuchspersonen ("Vpn")
N_f	" " unabhängigen Beurteilungskriterien ("Faktoren")
i,j	Indizes zur Bezeichnung der Säle i,j = 1 ... N_s
k	Index " " " Versuchspersonen k = 1 ... N_p
m	Index zur Bezeichnung der Faktoren m = 1 ... N_f
p^k_{ij}	Urteil der Versuchsperson k beim Vergleich der Säle i und j
P_k	$(N_s x N_s)$-Matrix der p^k_{ij} für festes k
R	$(N_p x N_p)$-Matrix der Korrelationskoeffizienten zwischen Präferenzskalen von Vpn
s_{ik}	Lage des Saales i auf der Präferenzskala der Vp k
S	$(N_s x N_p)$-Matrix der s_{ik}
w_{km}	"Wichtigkeit" des Faktors m für Vp k
x_{im}	Maßzahl des Saales i bezüglich Faktor m

Tabelle 2:

Mittelwert d. Folge a: $\bar{a} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{N} a_n$

Varianz d. Folge a: $v_a^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=1}^{N} (a_n - \bar{a})^2$

Standardabweichung d. Folge a: $v_a = \sqrt{v_a^2}$

Kovarianz d. Folgen a und b: $c_{ab} = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=1}^{N} (a_n - \bar{a}) \cdot (b_n - \bar{b})$

Korrelationskoeffizient zwischen den Folgen a und b:

$$r_{ab} = \frac{c_{ab}}{v_a \cdot v_b}$$

3.1. Die Fragestellung

Von den zahlreichen Möglichkeiten, Objekte vergleichend zu beurteilen, bieten sich bei einer Untersuchung von Schallfeldern an Konzertsaalplätzen einige besonders an. Man könnte z.B. wie bei der erwähnten Untersuchung von R.J. HAWKES et al. (1971) konkret nach Unterschieden bezüglich bestimmter subjektiv feststellbarer Merkmale der Schallfelder fragen. Eine derartige Fragestellung bringt einerseits den Vorteil, daß man die Ergebnisse der subjektiven Untersuchung nicht erst mit denen einer objektiven Messung vergleichen muß, um aussagen zu können, welches die Beurteilungskriterien sind. Andererseits besitzt sie aber auch einige Nachteile, die bereits in der Einleitung angesprochen wurden und hier noch einmal wiederholt werden sollen. Erstens besteht die Gefahr, daß durch eine unvollständige Auswahl der gefragten Merkmale wichtige Urteilskriterien gar nicht erfaßt werden; und zweitens ist es fraglich, ob verschiedene Personen mit rein semantisch definierten Eigenschaften, wie z.B. Halligkeit des Raumes, Durchsichtigkeit des Klanges usw., auch wirklich dasselbe verbinden. Für die vorliegende Untersuchung wurde deshalb eine möglichst neutrale Fragestellung gewählt, indem die Versuchspersonen in paarweisen Vergleichen aller in einer Untersuchungsreihe befindlichen Säle sich entscheiden müssen, welchen der beiden gerade verglichenen Säle sie bevorzugen. Man erhält auf diese Weise für jede Versuchsperson bei N_s Sälen $N_s \cdot (N_s - 1)/2$ Urteile, die sich numerisch in folgender Weise erfassen lassen:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} +1 & - \text{ Vp k bevorzugt Saal i vor Saal j} \\ -1 & - \text{ " k " " j " " i} \\ 0 & - \text{ keine Bevorzugung} \end{cases}$$

Die p_{ij}^k sind zu N_p $(N_s \times N_s)$-Matrizen zusammenzufassen, wobei entweder

$$p_{ji}^k = -p_{ij}^k$$

gesetzt wird, oder in oberer und unterer Dreiecksmatrix die Urteile von zweimaligem Vergleich desselben Paares eingesetzt werden. Diese Präferenzmatrizen P_k stellen die Rohdaten für die weitere Analyse dar.

3.2. Das Modell

Die psychologischen Vorgänge, die bei der Beurteilung von Schallfeldern in Konzertsälen ablaufen, sind sicher äußerst kompliziert; ein mathematisches Modell kann daher immer nur eine grobe Vereinfachung sein. Im folgenden sei ein Modell dargestellt, das auf einigen einfachen, aber plausiblen Annahmen darüber beruht, wie man zu einem Qualitätsurteil über ein Schallfeld in einem Konzertsaal kommt. Die Schallfelder unterscheiden sich bezüglich verschiedener subjektiv feststellbarer Eigenschaften, die sicher stark mit den objektiv meßbaren Parametern der Säle zusammenhängen. Diese Eigenschaften seien so definiert, daß sie als voneinander unabhängige Beurteilungskriterien, im weiteren kurz Faktoren genannt, aufgefaßt werden können, und eine Zahl x_{im} gebe an, wie stark der Faktor m bei dem Schallfeld aus Saal i ausgeprägt ist. Wenn N_f solcher Faktoren vorhanden sind, kann man einen N_f-dimensionalen Raum definieren, dessen rechtwinklige Koordinatenachsen die Faktoren sind. Die Säle können als Punkte in diesem Faktorenraum dargestellt werden, indem man x_{im} als m-te Komponente eines Ortsvektors auffaßt, der den Saal i symbolisiert.

Da die Kriterien hinsichtlich der Schallfelder als gleichrangig angesehen werden müssen, ist es angebracht, bei einer gegebenen Gruppe von N_s Sälen die Maßzahlen x_{im} so zu normieren, daß sie über jedem Kriterium mit Mittelwert Null und Quadratsumme Eins verteilt sind, d.h.

$$\begin{aligned} \frac{1}{N_s} \cdot \sum_{i=1}^{N_s} x_{im} &= 0 \\ \sum_{i=1}^{N_s} x_{im}^2 &= 1 \quad . \end{aligned} \tag{3.2}$$

Unterschiede in der Beurteilung der Qualität der Säle durch verschiedene Versuchspersonen lassen sich erklären, indem man annimmt, daß für jede Person die einzelnen Faktoren verschieden wichtig sind. Wenn w_{km} die "Wichtigkeit" des

Faktors m für die Versuchperson k ist, so erhält man eine Bewertung s_{ik} des Saales i durch die Versuchsperson k, indem man die Maßzahlen x_{im} multipliziert mit den Gewichten w_{km} über die Faktoren aufsummiert:

$$s_{ik} = \sum_{m=1}^{N_f} w_{km} \cdot x_{im} \qquad (3.3)$$

Für festes k stellen die s_{ik} eine lineare Bewertungsskala der N_s Säle durch die Versuchperson k dar. Normiert man die Gewichte w_{km}, so daß ihre Quadratsumme für jede Versuchsperson gleich Eins ist, d.h.

$$\sum_{m=1}^{N_f} w_{km}^2 = 1 \ , \qquad (3.4)$$

dann kann man $w_{k\cdot} = (w_{k1}, \ldots, w_{kN_f})$ als Einheitsvektor im Faktorenraum auffassen. Die Bewertungsskalen s_{ik} erhält man durch senkrechte Projektion der Säle $x_{i\cdot}$ auf die Richtungsvektoren $w_{k\cdot}$ der Versuchspersonen. Gleichung (3.3) stellt dann das Skalarprodukt dar, das diese Projektion beschreibt.

In Fig. 24 ist ein zweidimensionales Beispiel für einen Faktorenraum dargestellt. Die Faktoren sind mit D1 und D2 bezeichnet. Beide Achsen umfassen das Intervall (-1,+1), und die Säle mit den Koordinatenwerten x_{im} sind durch Großbuchstaben gekennzeichnet. Die Vorzugsrichtungen für zwei Versuchspersonen sind durch Pfeile der Länge Eins, gemessen vom Ursprung aus, angegeben. Die Projektionen der Säle auf die Vorzugsrichtungen ergeben dann die Rangfolgen, wie die Versuchspersonen die Säle anordnen. In diesem Beispiel lautet die Rangfolge für Versuchsperson 1 B-A-C und für Versuchsperson 2 A-B-C.

Einen derartigen Raum, der ein Modell darstellt für die Art und Weise, wie bestimmte Reize oder Objekte aufgenommen und beurteilt werden, nennt man allgemein Perzeptionsraum. Wenn er, wie im vorliegenden Fall Bevorzugungen, d.h. Präferenzen erklären soll, spricht man speziell von einem Präferenzraum.

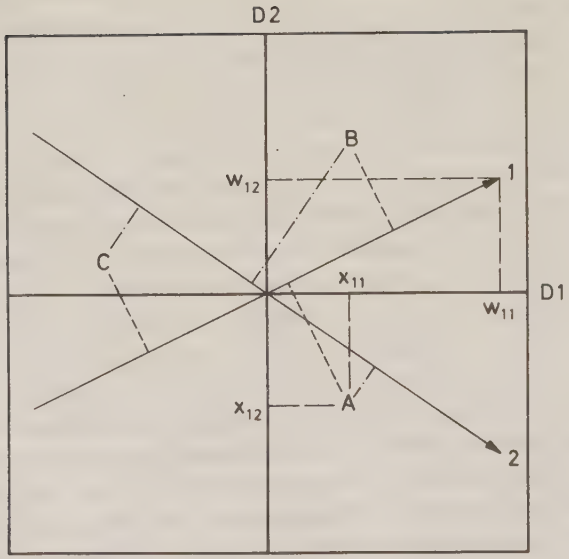

Fig. 24 Beispiel für einen zweidimensionalen Präferenzraum mit zwei Versuchspersonen und drei Sälen

3.3. Das Auswertungsverfahren

Ziel der numerischen Analyse der Rohdaten ist es, die Konfiguration der Säle und die Vorzugsrichtungen der Versuchspersonen in dem beschriebenen Modell des Präferenzraumes so zu bestimmen, daß die aus dem Modell zu berechnenden Präferenzmatrizen P_k möglichst gut mit den ursprünglichen P_k übereinstimmen. Die Grundzüge einer derartigen Analyse von Präferenzdaten wurden von P. SLATER (1960) dargestellt. Im Folgenden sei das Rechenverfahren in seinen wesentlichen Schritten beschrieben.

Als erstes wird aus der Präferenzmatrix jeder Versuchsperson eine lineare Präferenzskala berechnet. Eine Skala, die die ursprünglichen Elemente p^k_{ij} der Präferenzmatrix mit den wenigsten Abweichungen rekonstruieren läßt, erhält

man, indem man die Reihen und Spalten von P_k aufaddiert und die Differenz gleichnamiger Reihen und Spalten bildet. Die Zahlen

$$s_{ik} = \sum_{j=1}^{N_S} (p^k_{ij} - p^k_{ji}) = - \sum_{j=1}^{N_S} (p^k_{ji} - p^k_{ij}) = \tilde{s}_{ik} \quad (3.5)$$

sind ein Maß dafür, wieviel Mal häufiger Versuchsperson k den Saal i vorgezogen als abgelehnt hat (s_{ik}) oder umgekehrt ($\tilde{s}_{ik}$). Die Zahlen s_{ik}, von denen im Weiteren ausgegangen werden soll, sind dann umso größer, je besser Versuchsperson k den Saal i beurteilt. Die Skalen haben auf Grund ihrer Definition (3.5) für jede Versuchsperson den Mittelwert Null und sollen für die weitere Analyse auf Quadratsumme Eins normiert werden. Die N_p eindimensionalen Skalen bilden eine (N_sxN_p)-Matrix S=(s_{ik}). Es ist offensichtlich, daß die Matrix S weniger Information enthält als die N_p Matrizen P_k, und es ist nicht selbstverständlich, daß diese verlorene Information unberücksichtigt bleiben darf. Es muß deshalb an den Rohdaten untersucht werden, welche Information verlorengeht und ob sie tatsächlich vernachlässigt werden darf, ohne die Aussagekraft der Analyse mehr als geringfügig herabzusetzen. Auf dieses Problem soll genauer im Rahmen der Ergebnisse von Hörversuchen eingegangen werden.

In Fig. 25 sind als Beispiel zwei normierte Präferenzskalen dargestellt; mit N_s= 8 und N_p= 2 lautet die zuge-

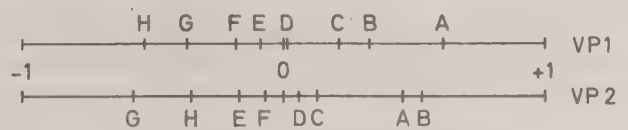

Fig. 25 Zwei Präferenzskalen

hörige (8x2)-Matrix S (hier transponiert geschrieben):

$$S^t = \begin{pmatrix} 0{,}61 & 0{,}33 & 0{,}21 & 0{,}02 & -0{,}08 & -0{,}18 & -0{,}39 & -0{,}54 \\ 0{,}46 & 0{,}53 & 0{,}12 & 0{,}07 & -0{,}17 & -0{,}08 & -0{,}58 & -0{,}35 \end{pmatrix}$$

Zur Konstruktion eines Präferenzraumes geht man aus von einer geometrischen Veranschaulichung der Matrix S. Dazu definiert man einen N_p-dimensionalen Raum, dessen rechtwinklige Koordinatenachsen die Präferenzskalen der Versuchspersonen sind. Die Säle werden in diesem Raum durch Punkte symbolisiert, deren Ortsvektoren die Zeilenvektoren von S sind. Für den Saal i steht dann ein Punkt mit den Koordinaten $(s_{i1}, \ldots, s_{iN_p})$. Der aus den beiden Präferenzskalen von Fig. 25 gebildete 2-dimensionale Raum ist in Fig. 26 dargestellt, die Säle sind hier durch Kleinbuchstaben gekenn-

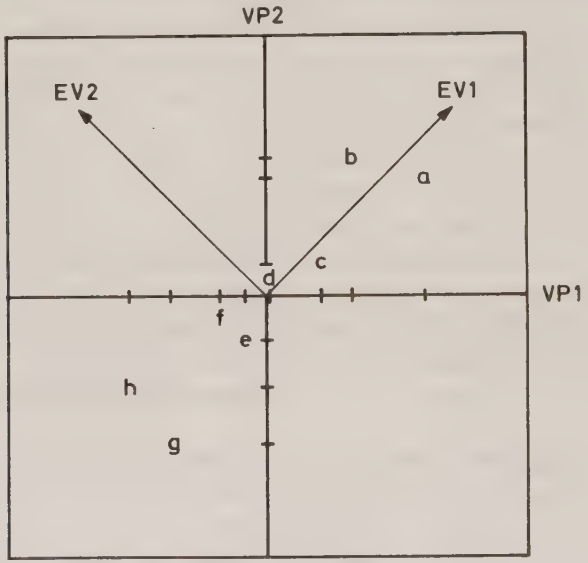

Fig. 26 Raum der Versuchspersonen, aufgespannt von den Präferenzskalen in Fig. 25

zeichnet. Eine entsprechende Darstellung der Versuchspersonen durch die Spaltenvektoren von S in einem N_s-dimensionalen Raum der Säle würde zu einem äquivalenten Ergebnis der Analyse führen und soll deshalb im weiteren nicht betrachtet werden.

In diesem Raum der Versuchspersonen läßt sich die Varianz in einer bestimmten Richtung definieren, indem man die Säle senkrecht auf eine Gerade projiziert, die in dieser Richtung durch den Ursprung geht. Die Varianz der Abstände der Fußpunkte dieser Projektionen vom Ursprung wird Varianz in dieser Richtung genannt. Die Varianz in Richtung der Koordinatenachsen ist definitionsgemäß gleich Eins, aber in allen anderen Richtungen kann sie Werte größer oder kleiner Eins annehmen. Will man nun die Richtung maximaler Varianz bestimmen, also die Raumrichtung, in der die Säle am weitesten gestreut liegen, danach die Richtung maximaler Varianz in dem zu der ersten Richtung orthogonalen Unterraum usw., so erhält man lineare Gleichungssysteme, deren Lösung zu den Eigenwerten und Eigenvektoren einer Matrix

$$R = S \cdot S^t$$

führt. Die Elemente der Matrix R sind die Kovarianzen und Varianzen der Zeilenvektoren von S, und da diese alle dieselbe Varianz haben, ist R bis auf den Faktor $1/(N_s - 1)$ gleich der Matrix der Korrelationskoeffizienten zwischen den Präferenzskalen der Versuchspersonen. Die Eigenwerte und Eigenvektoren von R, letztere sind für das Beispiel in Fig. 26 bereits eingezeichnet, besitzen folgende Eigenschaften:

1) Die Summe aller Eigenwerte ist gleich der Gesamtvarianz der Matrix S, da die Zeilen von S normiert sind, also gleich $N_p/(N_s-1)$.

2) Der zum größten Eigenwert gehörende Eigenvektor beschreibt im Raum der Versuchspersonen die Richtung maximaler Varianz, d.h. größter Streuung der Säle, und diese Varianz ist gleich dem Eigenwert.

3) Die Eigenvektoren stehen senkrecht aufeinander und beschreiben, geordnet in absteigender Folge der zugehörigen Eigenwerte, die Richtungen maximaler Restvarianz, wie oben beschrieben. Die Varianz in Richtung eines Eigenvektors ist gleich dem zugehörigen Eigenwert.

In dem Beispiel von Fig. 26 beträgt die Gesamtvarianz 0,286. Davon entfallen 0,274 in Richtung von Eigenvektor 1 (EV1) und 0,012 in Richtung von EV2.

Da die Eigenvektoren für die Anordnung der Säle eine besondere Bedeutung haben, soll nun von dem Koordinatensystem mit den Skalen der Versuchspersonen als Achsen zu einem neuen mit den Eigenvektoren der Korrelationsmatrix R als Basis übergegangen werden. Für die Konfiguration bedeutet das nur eine Rotation, ohne daß ihre gegenseitige Lage verändert wird. In diesem neuen System kann man die Präferenzskalen der Versuchspersonen als Richtungsvektoren angeben, auf die man die Säle rechtwinklig projizieren muß. Diese Richtungsvektoren erhält man als Spaltenvektoren einer Matrix, deren Zeilenvektoren die normierten Eigenvektoren von R sind. Diese rotierte Konfiguration der Säle ist in Fig. 27 durch Kleinbuchstaben dargestellt. Die Richtungen der Versuchspersonen sind die gestrichelt eingezeichneten Vektoren.

Die neuen Koordinatenachsen sollen nun als unabhängige Beurteilungskriterien im Sinne des im vorigen Abschnitts besprochenen Modells interpretiert werden. Da die Kriterien in Bezug auf die Säle als gleichrangig angesehen werden müssen, ist es sinnvoll, die Konfiguration der Säle so zu verändern, daß sie in Richtung aller Koordinatenachsen die Varianz Eins haben. Damit die Projektionen auf die Richtungen der Versuchspersonen auch weiterhin mit den linearen Präferenzskalen übereinstimmen, müssen auch diese Richtungen entsprechend verändert werden. Sei x''_{im} der Koordinatenwert des Saales i bezüglich des m-ten Eigenvektors (Konfiguration der Kleinbuchstaben in Fig. 27), w''_{km} die entsprechende Komponente des Richtungsvektors für Versuchsperson k (gestrichelte Pfeile in Fig. 27) und e_m der zum m-ten Eigenvektor gehörende Eigenwert, so erhält man die neuen Koordinaten der Säle und die veränderten Richtungsvektoren auf folgende Weise:

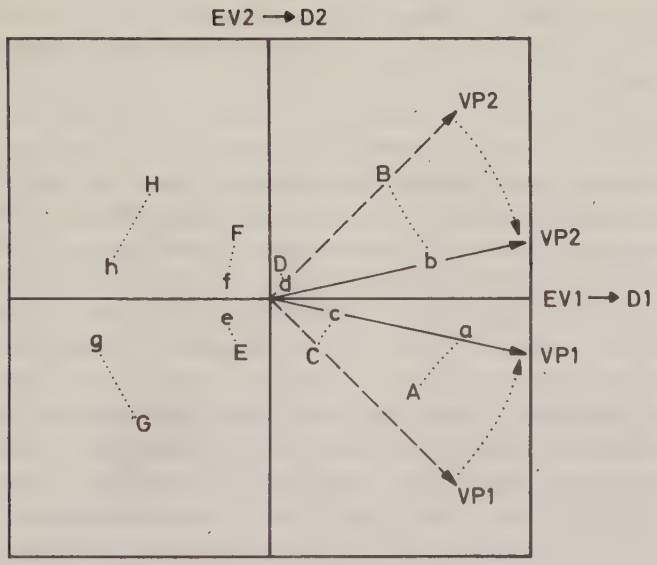

Fig. 27 Raum der Eigenvektoren (Kleinbuchst. und ----→)
und Raum der Faktoren (Großbuchst. und ——→)

$$x'_{im} = x''_{im} / \sqrt{e_m}$$
$$w'_{km} = w''_{km} \cdot \sqrt{e_m} \qquad (3.6)$$

Für festes i haben die x'_{im} die Varianz Eins, da e_m nach Konstruktion die Varianz der x''_{im} ist. Die durch die x'_{im} und w'_{km} gegebene Konfiguration der Säle und Richtungen der Versuchspersonen ist in Fig. 27 durch Großbuchstaben und ausgezogene Pfeile dargestellt. Die Projektionen der Säle auf die Richtungsvektoren der Versuchspersonen erhält man durch Bildung der Skalarprodukte zwischen den Vektoren $x'_{i\cdot}$ und $w'_{k\cdot}$. Diese Skalarprodukte lauten mit (3.6):

$$\sum_{m=1}^{N_p} (x'_{im} \cdot w'_{km}) = \sum_{m=1}^{N_p} (x''_{im} \cdot w''_{km}) \qquad (3.7)$$

Die rechte Seite dieser Gleichung stellt die Projektionen

im unveränderten Raum der Eigenvektoren dar, die aber definitionsgemäß gleich den ursprünglichen Präferenzskalen sind.

Der bisher erhaltene N_p-dimensionale Raum besitzt schon im Wesentlichen die Eigenschaften, die ein Präferenzraum nach dem beschriebenen Modell besitzen soll. In einem Koordinatensystem, dessen Achsen voneinander unabhängige Beurteilungskriterien darstellen sollen, sind Punkte als Symbole für die Säle so angeordnet, daß deren Projektion auf die Vorzugsrichtungen von Versuchspersonen lineare Präferenzskalen für diese ergeben, die das Zustandekommen der Einzelurteile mit den geringsten Abweichungen erklären können. Die Anzahl der Kriterien ist aber noch gleich der Anzahl der Versuchspersonen, was sicher nicht sinnvoll ist, da die Kriterien als Eigenschaften der Schallfelder aus den verschiedenen Sälen unabhängig von der Auswahl und vor allem auch von der Anzahl der Versuchspersonen seien müssen. Eine Reduktion der Dimensionszahl erreicht man, wenn man nur den Unterraum des N_p-dimensionalen Raumes nimmt, der von den Eigenvektoren zu den N_f größten Eigenwerten aufgespannt wird. Die Summe dieser N_f größten Eigenwerte, bezogen auf die Gesamtsumme der Eigenwerte ($= N_p$) gibt den Anteil der Gesamtvarianz der Matrix S an, der durch das N_f-dimensionale Modell repräsentiert wird. Die Gesichtspunkte, nach denen man die Zahl N_f bestimmt, werden bei der Besprechung der Ergebnisse einer derartigen Analyse genauer erläutert. Die Koordinaten der Säle im endgültigen Präferenzraum und die Komponenten der Richtungsvektoren der Versuchspersonen lauten dann:

$$x_{im} = x'_{im}$$

$$w_{km} = \frac{w'_{km}}{\sum_{n=1}^{N_f} w'^{2}_{nm}} \qquad (m = 1 \ldots N_f) \qquad (3.8)$$

Die individuellen Präferenzskalen, die man durch Projektion der Säle auf die Vorzugsrichtungen der Versuchspersonen in diesem N_f-dimensionalen Präferenzraum gewinnen kann, stimmen nun nicht mehr genau mit denjenigen überein, die der Analyse zugrunde gelegt wurden. Der mittlere Korrelationskoeffizient zwischen den ursprünglichen und den aus der N_f-dimensionalen Konfiguration zurückberechneten Präferenzskalen ist gleich der Quadratwurzel aus dem Verhältnis zwischen der in N_f Dimensionen repräsentierten und der gesamten Varianz der Matrix S. In dieser N_f-dimensionalen Gestalt entsprechen die Koordinatenachsen EV1 usw. gerade denjenigen des Modells D1, D2 usw..

Bei dem Beispiel (Fig. 25 bis 27) erkennt man aus der Konfiguration in Fig. 26 sofort, daß die beiden Versuchspersonen praktisch gleich urteilen. Es ist deshalb sinnvoll, einen eindimensionalen Präferenzraum anzunehmen, also $N_f = 1$ zu wählen. Die Vorzugsrichtungen der beiden Versuchspersonen fallen dann zusammen, und zwar in Richtung der Achse EV1 bzw. D1. Diese gemeinsame lineare Präferenzskala der beiden Versuchspersonen repräsentiert dann 96% der Varianz der Matrix S, und der Korrelationskoeffizient zwischen der Anordnung der Säle auf D1 und den beiden Zeilen von S ist gleich

$$\sqrt{0,96} = 0,98 .$$

4. Die subjektiven Untersuchungen an Konzertsälen

Mit dem in Kapitel 2 beschriebenen kopfbezogenen Stereoverfahren wurden in 25 Konzertsälen in Mitteleuropa Musikaufnahmen durchgeführt. Bei dieser Art der Aufnahme und Wiedergabe kann man, wie oben erläutert, davon ausgehen, daß die akustischen Eigenschaften des Konzertsaalplatzes, an dem sich der Kunstkopf befunden hat, in der Aufnahme gespeichert sind und bei der Wiedergabe weitgehend reproduziert werden. Die dadurch möglichen Direktvergleiche zwischen verschiedenen Konzertsälen werden mit einer Gruppe von Versuchspersonen durchgeführt und nach dem in Kapitel 3 beschriebenen Auswertverfahren analysiert. Bei den Versuchspersonen handelt es sich um ca. 15 willkürlich ausgewählte Mitarbeiter des Instituts, an dem diese Untersuchungen stattfinden. Wegen der Langwierigkeit der Hörversuche ist es leider nicht möglich, außenstehende Personen in die Untersuchungen einzubeziehen; aber die vorliegenden subjektiven Daten erlauben den Schluß, daß ein hinreichend breites Spektrum von Ansichten über akustische Qualität in die Ergebnisse eingeht.

4.1. Die Aufnahmen in den Sälen

In Tabelle 3 sind die 25 Konzertsäle, die in die Untersuchungen einbezogen sind, mit Angaben über Länge, Volumen, Zahl der Sitzplätze und Nachhallzeit zwischen 0,5 und 1 kHz, nach Literaturangaben für die besetzten Säle, zusammengestellt. Die Auswahl der Säle wurde zwar beeinflußt durch organisatorische Gegebenheiten, aber man kann doch sagen, daß sie bezüglich der angegebenen Daten als ein repräsentativer Querschnitt der existierenden Konzertsäle betrachtet werden können. Daher kann man damit rechnen, daß die Beurteilungen breit genug gestreut sind, um die wesentlichen Faktoren, die für die subjektive Beurteilung von Konzertsälen eine Rolle spielen, zu erfassen.

Tabelle 3:

Liste der Konzertsäle

Name des Saales	Ort	Länge (m)	Vol. (m^3)	Sitze	Nachh. (sek)
Saal d. Musikhochschule	Berlin	44,0	9600	1340	1,5
Kongresshalle	Berlin	37,0	12950	1220	0,9
Philharmonie	Berlin	66,0	24000	2200	1,9
Sendesaal des SFB	Berlin	47,0	12900	1120	1,8
Oetkerhalle	Bielefeld	38,0	10000	1200	1,5
Beethovenhalle	Bonn	49,0	15700	1400	1,7
Konzertsaal 'Die Glocke'	Bremen	40,5	10000	1400	2,0
Sendesaal des Hess. Rdfks.	Frankfurt	50,0	12000	1200	1,6
Saal der Deutschen Bank	Frankfurt	38,0	4800	670	1,4
Stadthalle	Göttingen	30,0	8200	1172	1,5
Saal d. Kaiserpfalz	Goslar	15,5	5200	800	1,2
Musikhalle	Hamburg	26,0	11500	1930	1,7
Sendesaal des WDR	Köln	35,0	6800	564	1,1
Herkulessaal	München	45,0	13600	1290	2,1
Liederhalle	Stuttgart	55,0	16000	2000	1,9
Concertgebouw	Amsterdam	43,0	18700	2200	2,1
Stadtcasino	Basel	33,0	10500	1400	1,8
Kongresshaus	Biel	32,5	10400	1240	1,5
Stadtsaal	Innsbruck	25,0	5600	700	1,7
Salle Musica	La Chaux-de-Fonds	32,0	7870	1032	1,7
Royal Festival Hall	London	50,0	22000	3000	1,7
De Doelen	Rotterdam	56,0	28000	2145	2,0
Gr. Festspielhaus	Salzburg	44,0	14000	2160	1,6
Musikvereinssaal	Wien	45,0	15000	1680	2,1
Konzerthaussaal	Wien	42,0	17000	2000	2,1

In allen Sälen wurden an zwei Plätzen im Parkett mit dem Kunstkopf Musikaufnahmen hergestellt. Die Lage dieser beiden Plätze ist in Fig. 28 dargestellt. Das Schema läßt sich ohne Schwierigkeiten auf die meisten der Säle anwenden. Bei wenigen, extrem von einem rechteckigen Grundriß abweichenden Saalformen wurde die Lage der Plätze so ausgewählt, daß sie mit der nach Fig. 28 vergleichbar ist. In zwei Sälen wurde auch noch an einem dritten Platz auf dem Balkon aufgenommen. Die Aufnahmen wurden im unbesetzten Saal durchgeführt. Als Schallquelle dienten zwei Lautsprecher auf der Bühne, s. Fig. 28, über die nachhallfrei aufgenommene Musik stereofon abgespielt wurde. Das dazu verwendete Tonband war bei der BBC aufgenommen und von A.N. BURD (1969) beschrieben worden. Bei dem Musikstück handelt es sich um den Schluß des vierten Satzes der Jupiter-Sinfonie von Mozart mit einer Dauer von ca. 2 Minuten.

Zusammen mit diesen Musikaufnahmen wurden noch die Impulsantworten der Säle auf Tonband festgehalten, angeregt durch einen Funkenknall. Mit diesen wird eine parallel laufende Untersuchung der objektiven akustischen Parameter der Konzertsäle durchgeführt, deren Ergebnisse in einer nachfolgenden Gegenüberstellung zu einer Interpretation der subjektiven Beurteilungskriterien führen sollen.

Es sei an dieser Stelle auch bereits angemerkt, daß das Ergebnis der Analyse der subjektiven Daten keine Rang- oder Qualitätsskala der in Tabelle 3 aufgeführten Konzertsäle sein kann und soll. Erstens wurden die Aufnahmen in den leeren Sälen gemacht, was in der Regel eine zum Teil erhebliche Verlängerung der Nachhallzeit bedeutet. Bei relativ trockenen Sälen kann das zu einer Verbesserung der akustischen Qualität führen, während Säle mit einer langen Nachhallzeit zu hallig und damit schlechter werden können. Zweitens stehen aus jedem Saal nur ganz bestimmte Plätze zum Vergleich, von denen man zwar annehmen kann, daß sie repräsentativ für einen größeren Bereich in ihrer Umgebung sind, aber eine

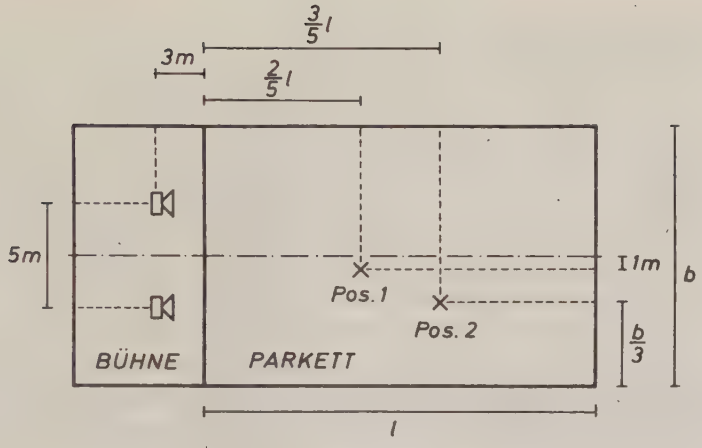

Fig. 28 Anordnung der Aufnahmeplätze in den Sälen

Aussage über den ganzen Saal kann auch aus diesem Grund nicht gemacht werden. Zusammenfassend ist zu diesem Punkt zu sagen, daß die Vergleichsobjekte, wie im Text schon mehrfach bezeichnet, Schallfelder an bestimmten Plätzen in Konzertsälen sind. Die objektiven akustischen Eigenschaften dieser Schallfelder hängen zwar zu einem Teil von dem Saal an sich ab, aber ein großer Teil dieser Eigenschaften ist beeinflußt durch den ausgewählten Platz und den leeren Zustand des Saales. Wenn man einen bestimmten Platz findet, der z.B. extrem gut oder schlecht beurteilt wird, so bedeutet das nur, daß die objektiven Eigenschaften des Schallfeldes an diesem Platz während der Aufnahme günstig oder ungünstig sind. Auf die subjektiv empfundene akustische Qualität eines ganzen Saales bezogen heißt das, wenn ganz bestimmte Eigenschaften der Schallfelder an der überwiegenden Zahl der Sitzplätze in einem mit Publikum besetzten Konzertsaal vorliegen, wird dieser Saal als subjektiv gut beurteilt werden.

4.2. Die Hörvergleiche

Die Paarvergleiche zwischen Musikaufnahmen von verschiedenen Konzertsaalplätzen werden, wie bereits erwähnt, in einem reflexionsfreien Raum durchgeführt. In Fig. 29 ist der Aufbau dazu skizziert, wobei Hörerplatz und Lautsprecher entsprechend den Angaben in Kapitel 2 angeordnet sind. Außerhalb des reflexionsfreien Raums laufen auf zwei Tonbandgeräten mit Studioqualität synchron die beiden gerade zu vergleichenden Aufnahmen und werden über das Wiedergabefilter (Abschnitt 2.3.4.) auf die beiden Lautsprecher gegeben. Für die Versuchspersonen bleiben die Aufnahmen grundsätzlich anonym und sind während eines Paarvergleichs durch zwei farbige Signallampen zu unterscheiden, die den beiden Tonbandgeräten fest zugeordnet sind. Die Versuchsperson kann mittels Knopfdruck beliebig zwischen den beiden Tonbandgeräten hin- und herschalten. Während der Dauer des Musikstückes muß sich die Versuchsperson entscheiden, welcher der beiden gerade verglichenen Konzertsaalplätze ihr besser gefällt, oder ob sie keinen davon dem anderen vorzieht. Falls sie schon vor Ende des Musikstückes zu einer Entscheidung kommt, kann sie den Vergleich selbst abbrechen. Das Urteil wird dem Versuchsleiter außerhalb des reflexionsfreien Raumes über ein Mikrofon mitgeteilt, der es in Form einer Zahl p_{ij}^{k} nach (3.1) notiert und auf den Tonbandgeräten ein neues Vergleichspaar bereitstellt. Die Paare von Aufnahmen folgen in quasi-stochastischer Reihenfolge. In Sitzungen von jeweils 15 bis 30 Minuten können die Versuchspersonen zwischen 10 und 20 Paarvergleiche durchführen.

Für die Wiedergabe wird die Lautstärke der einzelnen Aufnahmen so eingestellt, daß alle miteinander verglichenen subjektiv als gleich laut empfunden werden. Diese Einstellung erfolgt nur nach subjektiver Beurteilung, da kein objektives Verfahren gefunden werden konnte, das zu befriedigenden Ergebnissen führt. Durch diese Nivellierung wird

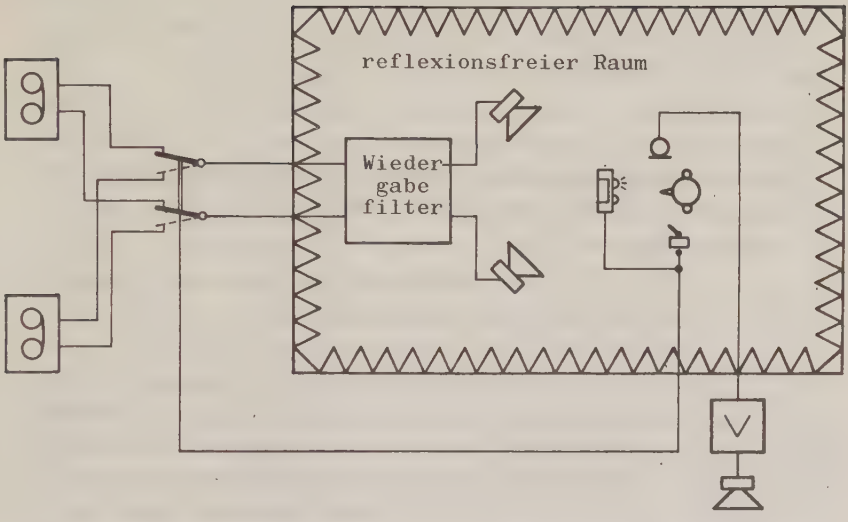

Fig. 29 Aufbau für die Durchführung der Hörvergleiche

zwar die subjektive Lautstärkeempfindung als Beurteilungskriterium ausgeschlossen, obwohl sie nach den Untersuchungen von K. YAMAGUSHI (1972) bei Direktvergleichen eine Rolle spielt. In mehreren Verleichsreihen hat sich aber gezeigt, daß auch nur geringfügige Lautstärkeunterschiede zu einer deutlichen Bevorzugung der lauteren Aufnahmen führen. Dies bedeutet sicher eine Verfälschung der Urteile, da normalerweise Konzertsäle nie direkt miteinander in ihrer absoluten Lautstärke verglichen werden können.

4.3. Die Ergebnisse der Hörvergleiche

Grundlage für alle Auswertungen sind die Präferenzmatrizen P_k als Rohdaten, die in den Hörvergleichen bestimmt werden. Diese Matrizen werden auf Lochkarten übertragen und die Auswertung nach Kapitel 3 mit einem Digitalrechner durchgeführt. Die numerisch Analyse hat drei Aufgaben:

1. Es muß überprüft werden, inwieweit die Zusammenfassung der Präferenzmatrizen zu eindimensionalen Präferenzskalen gerechtfertigt ist.
2. Die Zahl von Faktoren im Sinne von Kapitel 3 ist zu bestimmen, d.h. man muß feststellen, wie viele voneinander unabhängige Beurteilungskriterien die Versuchspersonen bei den vergleichenden Beurteilungen der Konzertsaalplätze anwenden.
3. Die Konfiguration der Konzertsaalplätze in dem beschriebenen Präferenzraum muß berechnet werden.

Da sich bei den Vergleichen sehr bald zeigte, daß einige Plätze grundsätzlich abgelehnt wurden und auch eindeutig feststand, daß der Grund dafür die extrem kurze Nachhallzeit der Säle war, wurden die drei Säle mit den kürzesten Nachhallzeiten aus der Untersuchung herausgenommen. Dies ist dadurch gerechtfertigt, daß die einhellige Beurteilung der Aufnahmen aus diesen dreimSälen durch alle Versuchspersonen einerseits einen großen Anteil an Varianz erzeugt, der die Differenzierung zwischen den anderen Sälen herabsetzt, und andererseits aber hinlänglich bekannt ist, daß ein extrem "trockener" Saal für Musikdarbietungen eine unzureichende akustische Qualität besitzt.

Im Verlauf der subjektiven Hörvergleiche ergab sich aus praktischen Gründen eine Einteilung der Aufnahmen aus den 22 verbleibenden Konzertsälen in vier Gruppen I bis IV. Die Säle selbst werden durch Großbuchstaben (nicht in der Reihenfolge von Tabelle 3!) gekennzeichnet. Die vier Gruppen setzen sich wie folgt zusammen:

Gruppe I: Die Aufnahmen an Pos. 1 in allen 22 Sälen; gekennzeichnet durch A bis Y (ohne die 'trockenen' Säle C, O und U).

Gruppe II: Ein Teil von Gruppe I, bestehend aus den 13 Aufnahmen A bis N (ohne C).

Gruppe III: Die restlichen 9 Aufnahmen von Gruppe I, Q bis Y (ohne U)

Gruppe IV: Je drei Aufnahmen aus den Sälen Q und T, bei denen auch ein Balkonplatz einbezogen ist, und je zwei Aufnahmen, Pos. 1 und 2, aus E und P.

Bei Gruppe I haben nicht alle Versuchspersonen sämtliche 231 Paarvergleiche, die bei 22 Aufnahmen möglich sind, durchgeführt. Die fehlenden Daten werden bei der Analyse durch errechnete Gewichtsfaktoren berücksichtigt.

4.3.1. Zur Zusammenfassung der Präferenzmatrizen zu eindimensionalen Präferenzskalen

Bei der Erläuterung des Auswertverfahren war bereits darauf hingewiesen, daß durch die Zusammenfassung der Matrizen P_k zu eindimensionalen Präferenzskalen s_{ik} Information verlorengeht. Diese verlorene Information besteht darin, daß die einzelnen Entscheidungen nicht mehr vollständig durch die Skala wiedergegeben werden können. Die Skala repräsentiert eine eindeutige Rangfolge der Vergleichsobjekte, während in den Einzelurteilen durchaus Inkonsistenzen vorliegen können. Diese bestehen darin, daß z.B. die drei Paarvergleiche zwischen den drei Schallfeldern A, B und C zu folgenden drei Urteilen führen:

A besser B
B besser C
C besser A

Eine derartige Triade von wiedersprüchlichen Urteilen sei kurz 'Zyklus' genannt; falls eines der drei Urteile unentschieden ist, wird von einem 'Halbzyklus' gesprochen.

Es ist prinzipiell denkbar, daß eine derartige zyklische Beurteilung in Eigenschaften der Schallfelder begründet ist. Nimmt man an, daß bei jedem der drei Schallfelder ein anderes subjektiv feststellbares Merkmal dominiert, dann kann es sein, daß sich die Relevanz dieser Merkmale für

die Urteilsbildung bezüglich der Bevorzugung entsprechend zyklisch verhält.

Zur Überprüfung der vorhandenen Inkonsistenzen werden bei 30 Präferenzmatrizen die Zyklen und Halbzyklen ausgezählt. Dabei ergibt sich, daß im Mittel bei jeder Versuchsperson 5,3 Prozent aller möglichen Zyklen und dazu 10,5 Prozent der Halbzyklen auftreten. Zählt man zusätzlich noch, wie viele der Zyklen bei verschiedenen Versuchspersonen gleich vorhanden sind, so zeigt sich, daß unter den aufgetretenen Zyklen 1,5 Prozent je dreimal, 10,5 Prozent je zweimal und die restlichen 76 Prozent nur einmal auftreten. Bereits aus diesen Zahlen geht hervor, daß in den Präferenzmatrizen mit großer Sicherheit keine relevanten Inkonsistenzen vorhanden sind, die auf entsprechende Eigenschaften der Schallfelder hindeuten würden. Das Zustandekommen der Zyklen läßt sich zudem in sehr vielen Fällen plausibel erklären. Eine mögliche Ursache ist, daß die drei Schallfelder einander sehr ähnlich sind. In diesem Fall kann es leicht eintreten, daß sich eine Versuchsperson mehr oder weniger statistisch entscheidet und es so zu einer zyklischen Bevorzugung kommt. Bei der Bildung der eindimensionalen Präferenzskala nach (3.5) hat aber ein Zyklus oder Halbzyklus, wie man leicht nachrechnen kann, keinen Einfluß auf die Lage der drei Schallfelder auf der Skala. Diese wird dann nur durch die Beurteilung der Vergleiche mit den restlichen Schallfeldern bestimmt. Eine zweite Ursache, die für das Zustandekommen einer ganzen Serie von Zyklen verantwortlich sein kann, ist ein Fehler beim Ansagen oder Notieren eines einzigen Urteils. Angenommen, von zwei Schallfeldern wird das eine bezüglich der übrigen fast eindeutig abgelehnt und das andere bevorzugt; tritt dann aber beim Vergleich dieser beiden untereinander ein solches Fehlnotieren auf, so gibt es Zyklen der beiden Schallfelder mit fast allen anderen als drittem Partner. Aber auch solch ein einzelner Fehler hat auf die Präferenzskala nur eine sehr geringe Wirkung und kann vernachlässigt werden.

Aus den eindimensionalen Präferenzskalen lassen sich durch Zurückrechnen Präferenzmatrizen aufstellen, die zwar nicht genau mit den eingegebenen übereinstimmen, aber frei von Inkonsistenzen sind. Der Korrelationskoeffizient zwischen ursprünglichen und errechneten Matrizen beträgt im Mittel 0,64. Diese Übereinstimmung kann als hinreichend betrachtet werden, wenn man sie mit der Reproduzierbarkeit der Präferenzmatrizen durch die Versuchspersonen vergleicht. Hier erhält man für zwei Präferenzmatrizen derselben Versuchsperson, die eine Gruppe von Sälen zweimal vollständig paarweise verglichen hat, praktisch den gleichen gemittelten Korrelationskoeffizienten von 0,65.

Zusammenfassend kann man sagen, daß in den Präferenzmatrizen ein Teil zufällig entstandener Information steckt, die nicht reproduzierbar ist. Im Falle der vorliegenden Untersuchungen ist diese Information überflüssig und kann sogar störend wirken, indem wichtige Information verdeckt wird. Faßt man die Matrizen aber zu eindimensionalen Skalen zusammen, so werden auf jeden Fall Inkonsistenzen aufgehoben, die nach den bisherigen Auszählungen offensichtlich nur zufällig zustande kommen; andererseits lassen sich aus den Skalen Präferenzmatrizen rekonstruieren, die genauso gut mit den vorgegebenen übereinstimmen, wie die durch eine neue Serie von Hörversuchen bestimmten.

4.3.2. Die Bestimmung der Faktorenzahl

Die Anzahl N_f von Faktoren, die den Präferenzraum aufspannen, sagt aus, wie viele voneinander unabhängige Beurteilungskriterien die Versuchspersonen bei den subjektiven Qualitätsvergleichen zwischen Schallfeldern aus verschiedenen Konzertsälen angewendet haben. Bei der Bestimmung von N_f ist es das Ziel, durch möglichst wenige Faktoren einen möglichst großen Anteil der Gesamtvarianz der Rohdaten, hier der Gesamtheit der Präferenzskalen, zu repräsentieren. Es gibt verschiedene Gesichtspunkte, nach denen man N_f bestimmen kann; im folgenden werden zwei Verfahren erläutert und angewandt.

Als erstes sei im Ablauf der Analyse die Rotation des Raumes der Versuchspersonen (Fig. 26) zu einem Raum mit den Richtungen maximaler Varianz bzw. Restvarianz, den Eigenvektoren von R, als Koordinatenachsen (Fig. 27) betrachtet. Vor der Rotation hat man Achsen , die gleichrangig sind, d.h. alle repräsentieren denselben Prozentsatz der Gesamtvarianz. In dem gedrehten Koordinatensystem entfallen aber auf einen Teil der Koordinatenachsen größere, und auf einen anderen Teil kleinere Anteile an der Varianz als vorher. Es ist nun auch in der Faktorenanalyse üblich, siehe z.B. K. ÜBERLA (1968) S. 123 ff, als Basis für den Faktorenraum diejenigen Eigenvektoren zu nehmen, die mindestens denselben Anteil an der Gesamtvarianz repräsentieren, wie die einzelnen Koordinatenachsen des ursprünglichen Raumes. Dadurch werden genau die Eigenvektoren als unwichtig angesehen und fortgelassen, die zugunsten anderer Varianz abgegeben haben.

In Tabelle 4 sind für die Gruppen I bis IV die Varianzanteile der sechs wichtigsten Eigenvektoren in Prozentangaben zusammengestellt. In der letzten Spalte ist jeweils angegeben, wieviel Varianz im Raum der Versuchspersonen auf eine Koordinatenachse entfällt.

Tabelle 4:

Gruppe	Eigenvektor 1	2	3	4	5	6		Varianz pro Achse
I	45,4	15,9	11,7	7,4	4,9	3,9	...	7,7
II	39,2	25,7	11,0	8,0	6,1	3,7	...	7,7
III	65,2	10,5	8,9	5,9	5,0	2,5	...	11,1
IV	46,9	20,5	13,9	9,9	4,1	2,6	...	9,1

Nach dem beschriebenen Kriterium erhält man aus der Tabelle für die Gruppen I, II und IV vier Faktoren, während bei Gruppe III zwei ausreichen würden. Das Herausfallen von Gruppe III ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß hier zwischen den einzelnen Aufnahmen relativ deutliche Quali-

tätsunterschiede festzustellen sind, was zu einer guten Übereinstimmung zwischen den Versuchspersonen, und damit zu einem Wirksamwerden nur weniger Faktoren führt. Demgegenüber besteht Gruppe IV aus Aufnahmen, die sich zum Teil sehr ähnlich sind, weshalb auch mit 9,9 gegenüber 9,1 Prozent das Vorhandensein eines vierten Faktors am deutlichsten angezeigt wird.

Ein zweites Kriterium für die Bestimmung von N_f ist die Betrachtung der Varianzanteile, aufgetragen über den Eigenvektoren. In Fig. 30 bis 32 sind für die Gruppen I, II und IV die Varianzanteile der Eigenvektoren als Säulen aufgetragen, darüber eine Kurve, die die Summe der Einzelvarianzen bis zu dem entsprechenden Eigenvektor darstellt. Die Deutung dieser Darstellungen läßt sich am besten an Fig. 32 beschreiben. Hier sieht man, daß in der Darstellung der Varianzsumme bei Eigenvektor 4 ein deutlicher Knick und in der Auftragung der Varianzen eine Stufe auftreten. Derartige Merkmale zeigen an, daß von dem entsprechenden Eigenvektor an die Hinzunahme weiterer als Faktoren nur eine merklich geringere Vermehrung der repräsentierten Varianz zur Folge hat. Dieses Kriterium läßt sich also nur dann sinnvoll anwenden, wenn eines der beschriebenen Merkmale in den beiden Auftragungen von Varianz und Varianzsumme über den Eigenvektoren vorhanden ist. Man muß dann die Eigenvektoren bis zu demjenigen, bei dem der Knick oder die Stufe sich befinden, als Faktoren übernehmen. Für Gruppe IV in Fig. 32 findet man wieder eindeutig vier Faktoren, während dieses Kriterium bei Gruppe I, Fig. 30, praktisch nicht anwendbar ist. Bei Gruppe II in Fig. 31 zeigt dieses Kriterium im Gegensatz zum ersten nur zwei Faktoren an.

Die Resultate der beiden Verfahren zur Bestimmung von N_f lassen zusammengefaßt den Schluß zu, daß vier Faktoren vorliegen. Wenn auch bei beiden Kriterien für einzelne Gruppen eine geringere Zahl von Faktoren gefunden wird, ist es doch angebracht, die größere Zahl zu nehmen, da es

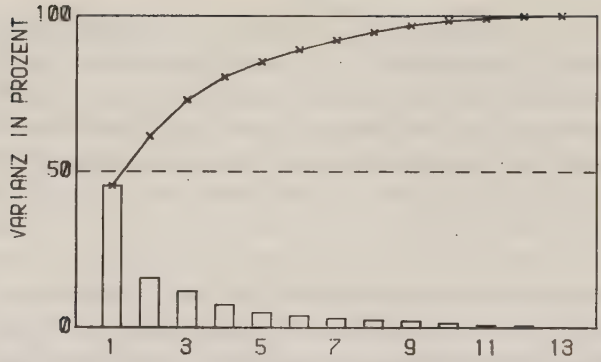

Fig. 30 Varianz und Varianzsumme der Eigenvektoren für Gruppe I

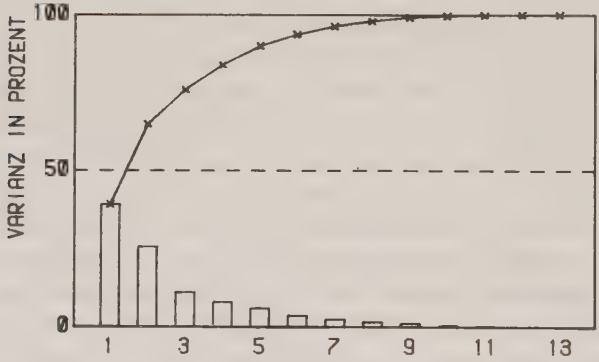

Fig. 31 Varianz und Varianzsumme der Eigenvektoren für Gruppe II

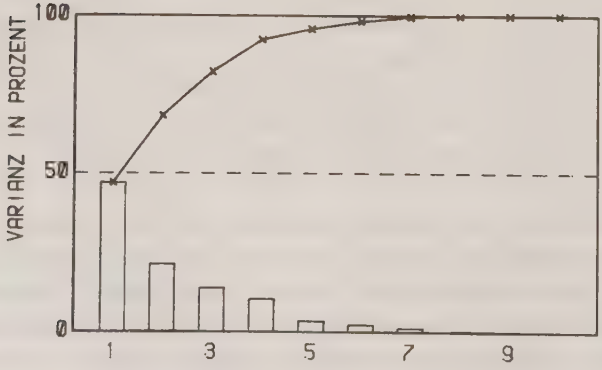

Fig. 32 Varianz und Varianzsumme der Eigenvektoren für Gruppe IV

sicher möglich ist, daß je nach Zusammenstellung der Gruppen einzelne Faktoren bei der Beurteilung der verglichenen Schallfelder nicht herangezogen zu werden brauchen. Aus Tabelle 4 und Fig. 30 bis 32 geht damit hervor, daß bei der subjektiven Beurteilung von Schallfeldern an Konzertsaalplätzen vier unabhängige Kriterien angewendet werden, die zu der Gesamtvarianz Anteile in Verhältnis von rund 10:4:3:2 beitragen. Zusammen repräsentieren diese vier Faktoren immer mehr als 80 Prozent der Ausgangsvarianz, was bedeutet, daß die Korrelation zwischen den Präferenzskalen der Versuchspersonen und den Vorzugsrichtungen im vierdimensionalen Präferenzraum nach dem am Schluß von Kapitel 3 Gesagten 0,9 und höher ist.

4.3.3. Die Konfiguration der Schallfelder im Präferenzraum

In Fig. 33 sind die Projektionen der Schallfelder aus Gruppe I (A bis Y) und der Vorzugsrichtungen von 13 Versuchspersonen auf die sechs Koordinatenebenen des vierdimensionalen Präferenzraumes dargestellt. In den Auftragungen des ersten Faktors D1 gegen die drei anderen Faktoren (Fig. 33 a) erkennt man deutlich, daß die Richtung von D1 den Schwerpunkt der Vorzugsrichtungen aller Versuchspersonen bildet. Die Richtungsvektoren, mit Zahlen 1 bis 13 bezeichnet, ordnen sich büschelartig um D1 an, und mit einer Ausnahme (13) sind die Projektionen dieser Richtungsvektoren positiv. Da die "Wichtigkeiten" der Faktoren (s. Abschnitt 3.2.) mit diesen Projektionen übereinstimmen, heißt das, daß die Versuchspersonen, von 13 abgesehen, den Faktor D1 in gleichem Sinne bewerten. Das D1 unterliegende Merkmal bewirkt durch die Stärke seiner Ausprägung für alle Versuchspersonen in gleicher Weise eine Verbesserung oder Verschlechterung der subjektiv empfundenen Qualität. Diese Eigenschaft von Faktor D1, daß er eine idealisierte Versuchsperson darstellt, die so urteilt, wie der Durchschnitt aller echten Versuchspersonen, liegt in der Art der Berechnung

PRAEFERENZ-ANALYSE

M1 - M1A/22 SAELE/VPN:GT,KR,ME,SB,EY,GE,WB,WG,SC,BR,TB,KE,SE

4 - DIMENSIONAL

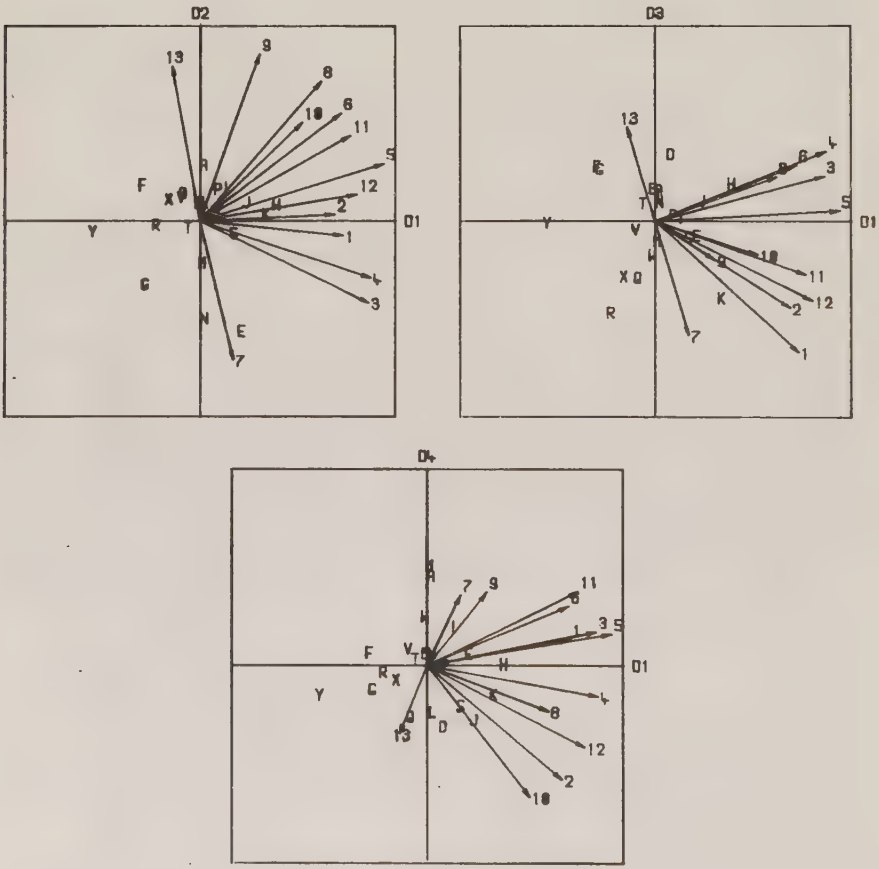

Fig. 33 a Faktorenraum der 22 Schallfelder von Gruppe I mit Vorzugsrichtungen von 13 Versuchspersonen

PRAEFERENZ-ANALYSE

M1 - M1A/22 SAELE/VPN:GT,KR,ME,SB,EY,GE,WB,WG,SC,BR,TB,KE,SE

4 - DIMENSIONAL

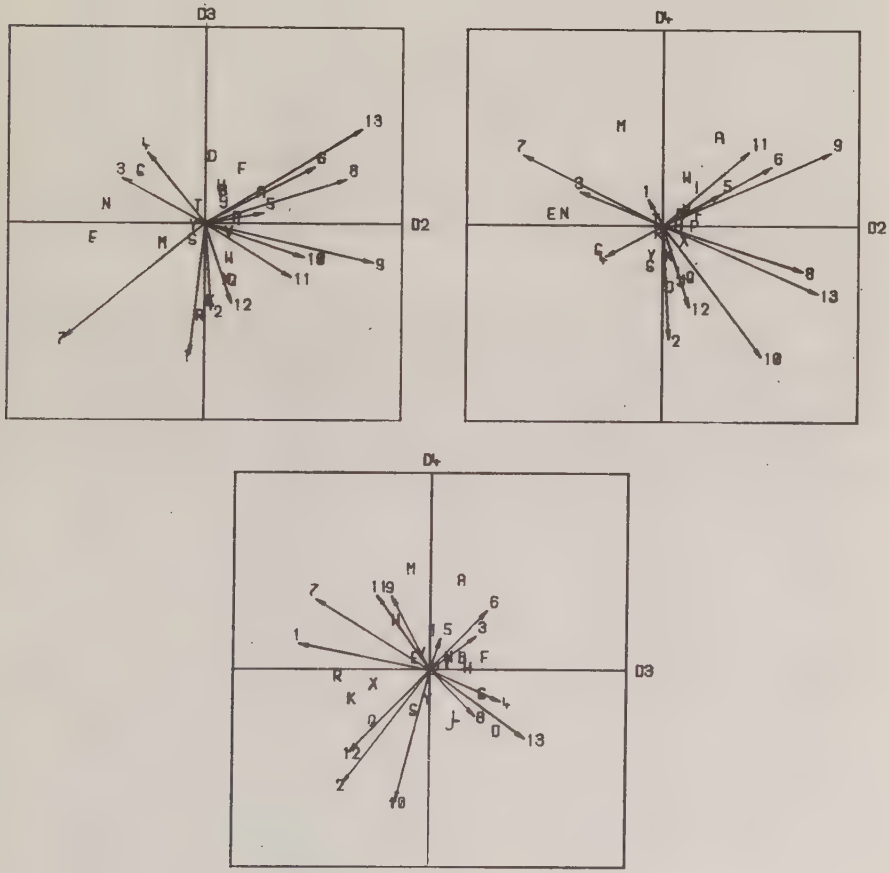

Fig. 33 b dto.

der Faktoren begründet. D1 geht im wesentlichen aus derjenigen Richtung im Raum der Versuchspersonen hervor (s. Fig. 26), in der die beurteilten Schallfelder am stärksten gestreut sind und steht damit für die Gemeinsamkeiten der individuellen Präferenzskalen. Als die gesuchte subjektive Qualitätsskala müssen daher die Projektionen der Schallfelder auf den Faktor D1 betrachtet werden. Der Grad der Übereinstimmungen zwischen den Versuchspersonen und damit die absolute Relevanz der gemeinsamen Qualitätsskala wird ausgedrückt durch den Varianzanteil, den D1 repräsentiert. Nach Tabelle 4 sind das im Mittel 45 Prozent der Gesamtvarianz und über 50 Prozent der Varianz im vierdimensionalen Präferenzraum. Daraus kann man folgern, daß es eine gemeinsame Qualitätsskala gibt, die etwa die Hälfte der Varianz von vergleichenden Urteilen zwischen Schallfeldern an verschiedenen Konzertsaalplätzen erklären kann.

Die restliche Varianz läßt sich durch drei weitere Faktoren erklären, die aber von verschiedenen Versuchspersonen entgegengesetzt gewertet werden. Änderungen der Merkmale der Schallfelder, die diesen Faktoren unterliegen, können die über alle Versuchspersonen gemittelte subjektive Qualitätsbeurteilung nicht mehr in einer bestimmten Richtung beeinflussen. In den Auftragungen der Faktoren D2, D3 und D4 gegeneinander (Fig. 33 b) läßt sich erkennen, daß es zwar gewisse Gruppierungen von Versuchspersonen gibt, was man als übereinstimmenden Geschmack der ähnlich urteilenden Versuchspersonen interpretieren kann. Die Vermutung allerdings, daß diese Übereinstimmungen auf sonstige gemeinsame Interessen der Versuchspersonen hinweisen, läßt sich in keiner Weise durch die bisherigen Ergebnisse bestätigen. Ein Teil der Versuchspersonen z.B., die musikalisch als Ausübende oder regelmäßige Konzertbesucher stark engagiert sind und bei den vorliegenden Untersuchungen als Gruppierung prädestiniert wären, streuen in ihren Vorzugsrichtungen untereinander ebenso stark wie gegenüber den anderen Versuchspersonen.

Die Anordnung der Schallfelder in dem Präferenzraum ist die Grundlage für eine Interpretation der Faktoren als Repräsentanten bestimmter objektiver Merkmale der verglichenen Schallfelder. Zu dieser Interpretation ist es erforderlich, die objektiven akustischen Eigenschaften der Säle und der Schallfelder an den Aufnahmeplätzen in ähnlicher Weise wie die subjektiven Präferenzskalen zu analysieren. Bereits vorliegende neuere Untersuchungen an objektiven Daten von Konzertsälen, z.B. von P. LEHMANN (1972), weisen darauf hin, daß die Vielzahl der Meßgrößen als Kombinationen weniger Grundgrößen, die man als objektive Faktoren bezeichnen könnte, zu verstehen sind. Eine Interpretation der subjektiven Faktoren muß dann von einem Vergleich der Strukturen des subjektiven und objektiven Faktorenraumes ausgehen.

In Fig. 34 ist in gleicher Weise wie in Fig. 33 der Präferenzraum der zehn Schallfelder aus Gruppe IV und von zehn Versuchspersonen gezeigt. Da hier mehrere Aufnahmen aus denselben Sälen beteiligt sind, wird die Position des Aufnahmeplatzes durch eine Ziffer hinter dem Buchstabensymbol gekennzeichnet, Position 1 und 2 nach Fig. 28, Position 3 auf dem Balkon. Die Schallfelder mit der Ziffer 1 sind damit dieselben wie diejenigen ohne Ziffer in Gruppe I. Der Zusammenhang zwischen Fig. 33 und Fig. 34 läßt sich dann herstellen, indem man E mit E1 usw. vergleicht. Dabei sieht man, daß E1, P1 und T1 mit E, P und T in ihrer Lage auf D1 in Übereinstimmung zu bringen sind, wenn man die Darstellung in Fig. 34 auf ungefähr ein Viertel komprimiert und etwas nach rechts verschiebt. Das bedeutet, daß die Unterschiede zwischen den Schallfeldern innerhalb der Gruppe IV gegenüber denjenigen innerhalb der Gruppe I deutlich geringer sind und der Präferenzraum in Fig. 34 einen kleinen Ausschnitt aus dem in Fig. 33 darstellt. Die Ursache für die Abweichung der Lage von Q1 gegenüber Q muß darin liegen, daß durch die verschiedenen Zusammensetzungen der beiden Gruppen die unabhängigen Beurteilungskriterien in etwas

PRAEFERENZ-ANALYSE

M 1-3/10 PLAETZE/VPN: WT,ME,WG,SC,KR,EY,GT,SB,WB,GE

4 - DIMENSIONAL

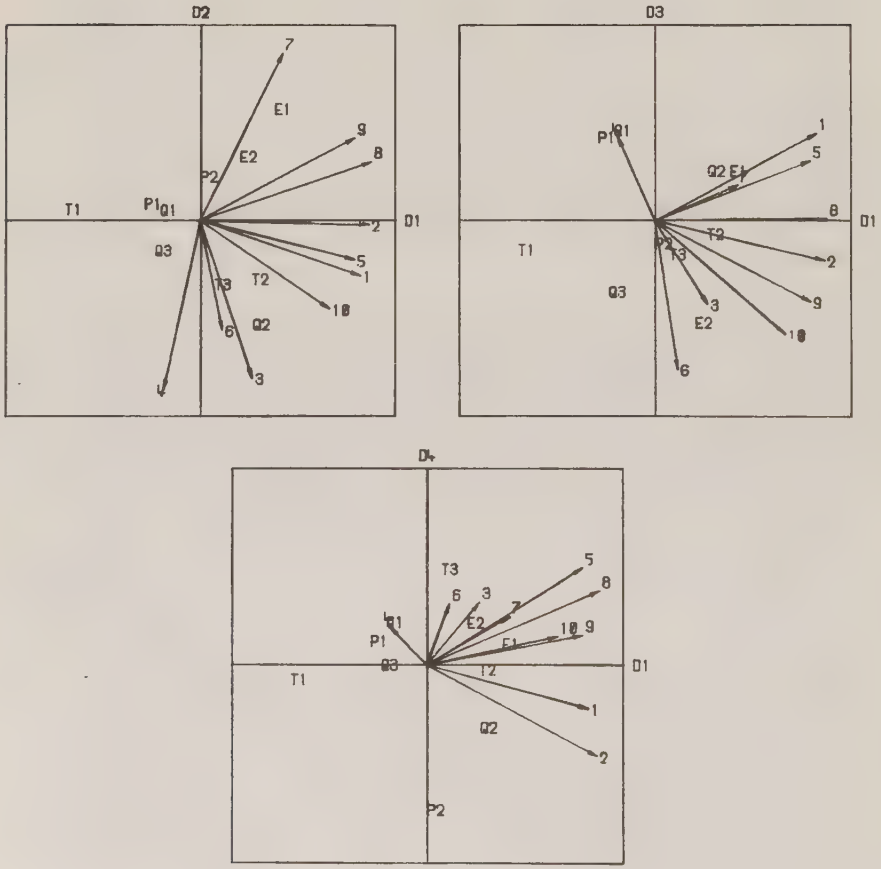

Fig. 34 a Faktorenraum der 10 Schallfelder von Gruppe IV mit Vorzugsrichtungen von 10 Versuchspersonen

PRAEFERENZ-ANALYSE

M 1-3/10 PLAETZE/VPN: WT,ME,WG,SC,KR,EY,GT,SB,WB,GE

4 - DIMENSIONAL

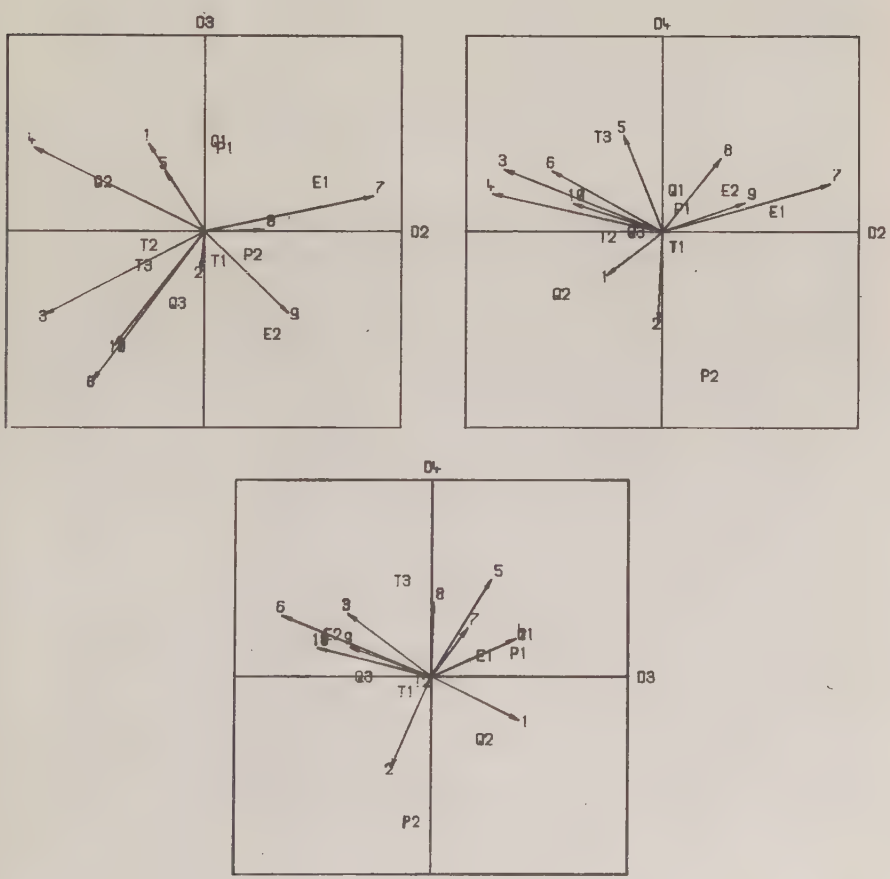

Fig. 34 b dto.

abweichender Weise zur Anwendung kommen. Ein bemerkenswertes Ergebnis der Analyse von Gruppe IV ist die Tatsache, daß die Unterschiede zwischen den verschiedenen Plätzen aus einem Saal von derselben Größenordnung wie diejenigen zwischen Aufnahmen aus verschiedenen Sälen sind. Dabei handelt es sich bei den Sälen in Gruppe IV zwar um solche, die innerhalb der Gesamtheit der untersuchten Säle nicht sehr stark unterschieden sind, aber es ist mit Sicherheit der Schluß gerechtfertigt, daß eine Rangfolge unter Konzertsälen bezüglich ihrer Qualität nicht aufgestellt werden kann. Von einem bestimmten Konzertsaal läßt sich allenfalls sagen, daß er zu einer Gruppe von mehr oder weniger gut beurteilten Sälen gehört.

Zusammenfassend kann man aus den beiden unterschiedlichen Darstellungen des Präferenzraumes schließen, daß die eigentliche Form dieses Raumes nicht durch eine einzige Vergleichsreihe bestimmt werden kann. Die Zusammensetzung der Gruppen von miteinander verglichenen Schallfeldern führt zu einer unterschiedlichen Beanspruchung der unabhängigen Beurteilungskriterien, so daß die Interpretation eines bestimmten Kriteriums mit der einen Gruppe von Schallfeldern viel leichter sein kann als mit der anderen. Für einen differenzierteren Vergleich zwischen subjektiven und objektiven Daten scheint es daher sinnvoll zu sein, die untersuchten Schallfelder zu Gruppen, ähnlich den hier allerdings zufällig entstandenen Gruppen I bis IV, zusammenzufassen. Das könnte z.B. in der Weise geschehen, daß man Schallfelder zusammen in eine Vergleichsreihe nimmt, die sich bezüglich eines objektiven Merkmals praktisch nicht unterscheiden, um so eine bessere Differenzierung bei den übrigen Eigenschaften zu erhalten.

4.4. Zusammenfassung und Folgerungen aus den Resultaten

Die in dieser Arbeit beschriebenen subjektiven Untersuchungen an Schallfeldern aus 22 Konzertsälen haben ergeben, daß bei Vergleichen dieser Schallfelder bezüglich ihrer subjektiv empfundenen akustischen Qualität durch die Versuchspersonen vier verschiedene, voneinander unabhängige Beurteilungskriterien angewendet werden. Das wichtigste Kriterium drückt die Übereinstimmung zwischen den Versuchspersonen aus, und da es ungefähr die Hälfte der Varianz der Beurteilungen repräsentiert, kann man von der Existenz einer gemeinsamen Qualitätsskala für Schallfelder in Konzertsälen sprechen. Die weiteren drei Kriterien repräsentieren jeweils nur einen geringen Anteil der Varianz und werden von verschiedenen Versuchspersonen in entgegengesetzter Weise zur Urteilsbildung herangezogen, sie hängen also mit dem persönlichen Geschmack der Versuchspersonen zusammen. Eine Deutung der Kriterien kann hier nicht erfolgen, dazu ist eine umfassende Analyse der objektiven Daten derselben Schallfelder erforderlich.

Hat man eine derartige qualitative Interpretation der Beurteilungskriterien durch objektive Parameter gefunden, so kann mit den beschriebenen Verfahren auch der quantitative Zusammenhang zwischen objektiven Eigenschaften und subjektiven Urteilen untersucht werden. Hierzu ist es möglich, durch den Einsatz von Digital-Rechnern bei der Bearbeitung von Schallsignalen einzelne objektive Parameter definiert zu verändern und dabei alle anderen zu erhalten. Weiterhin ist es sinnvoll, eine Untersuchung der Abhängigkeit der angewendeten Beurteilungskriterien von der Art der für die Vergleiche benutzten Musikstücke durchzuführen.

Herrn Professor Dr. M.R. Schroeder möchte ich für die Themenstellung zu dieser Arbeit und sein stetes Interesse am Fortgang der Untersuchungen danken, das sich in zahlreichen fördernden Diskussionen ausdrückte.

Den Herren Dr. P. Damaske, Dr. V. Mellert und D. Gottlob danke ich für die vielen wertvollen Diskussionen und die praktische Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen.

Mein besonderer Dank gilt auch den Versuchspersonen für deren Teilnahme an den langwierigen Hörvergleichen.

Die Mittel für diese Untersuchungen wurden in dankenswerter Weise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt.

Der benutzte Digital-Rechner ist die Rechenanlage des III. Physikalischen Instituts der Universität Göttingen, ein System Honeywell H 632 mit 24 K Kernspeicher, einer Bandeinheit, zwei Platteneinheiten, einem Digitalplotter und den Standard Ein- und Ausgabeeinheiten.

Literatur:

BERANEK, L.L.	'Music, Acoustics & Architecture' New York 1962
BLAUERT, J.	Dissertation, Technische Hochschule Aachen 1969
BURD, A.N.	Rundfunktechnische Mitteilungen 13 (1969), S. 200
BURGTORF, W. SERAPHIM, H.-P.	Acustica 11 (1961), S. 93
DAMASKE, P.	JASA 50 (1971), S. 1109
HAWKES, R.J. DOUGLAS, H.	Acustica 24 (1971), S. 235
YAMAGUCHI, K.	JASA 52 (1972), S. 1271
LAWS, P.	Gemeinschaftstagung Akustik und Schwingungstechnik 1972 Stuttgart
LEHMANN,P.	Gemeinschaftstagung Akustik und Schwingungstechnik 1972 Stuttgart
MELLERT, V.	Dissertation, Universität Göttingen 1972[1]
MELLERT, V.	JASA 51 (1972)[2], S. 1359
MEYER, E. BURGTORF, W. DAMASKE, P.	Acustica 15 (1965), S. 339
SCHROEDER, M.R. ATAL, B.S.	IEEE International Convention Record 1963
SCHROEDER, M.R. LOGAN, B.F.	60th Meeting of the ASA 1960 (S3)
SCHROEDER, M.R. LOGAN, B.F.	IEEE Trans. on Audio and Electroacoustics AU-9 (1961), S. 209
SHAW, E.A.G. TERANISHI, R.	JASA 44 (1968), S. 240
SLATER, P.	Brit. Jour. Statistical Psychology 8 (1960), S. 119
SOMERVILLE, T.	Acustica 3 (1953), S. 409
ÜBERLA, K.	'Faktorenanalyse' Berlin Heidelberg New York 1968

WAGENER, B. Acustica 25 (1971), S. 203

Zur Fast-Fourier-Transform (FFT):

COOLEY, J.W. TUKEY, J.W. Math. of Comput. 19 (1965), S. 297

G-AE Subcommittee on Measurement Concepts IEEE Trans. Audio and Electroacoustics AU-16 (1967), S. 45

Zu digitalen Filtern:

KAISER, J.F. 'System Analysis by Digital Computer' New York 1966

G-AE Concepts Subcommittee IEEE Trans. Audio and Electroacoustics AU-16 (1968), S. 303

HELMS, H.D. dto. S. 336

Lebenslauf

Ich, Karl Friedrich Siebrasse, wurde am 2. Juli 1943 als erster von zwei Söhnen des Bauschlossers Richard Siebrasse und seiner Ehefrau Irmgard geb. Schäfer in Eschwege geboren. Dort besuchte ich von 1950 bis 1954 die Volksschule und anschließend bis 1963 die Friedrich-Wilhelm-Schule, das dortige Gymnasium, an der ich im März 1963 das Abitur ablegte. Danach ging ich für zwei Jahre freiwillig zur Bundeswehr, die ich 1965 als Leutnant der Reserve verließ.
Im Sommersemester 1965 begann ich an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität in Frankfurt am Main das Physikstudium und legte dort im Mai 1967 das Vordiplom ab. Zum Wintersemester 1967/68 wechselte ich über an die Georg-August-Universität Göttingen, wo ich nach Ende des Sommersemesters 1968 im Dritten Physikalischen Institut unter Professor Dr. Erwin Meyer eine Arbeit über Wasserschallabsorber begann. Diese schloß ich mit dem Diplom im Dezember 1969 ab.
Seitdem arbeite ich unter Professor Dr. Manfred R. Schroeder im Rahmen eines Forschungsauftrages der Deutschen Forschungsgemeinschaft an einer vergleichenden Untersuchung von Konzertsälen.